

DOI: 10.11766/trxb202002280077

彭新华, 王云强, 贾小旭, 高伟达, 张中彬, 姚荣江, 赵英, 沈重阳, 陈丁江, 朱青, 高磊. 新时代中国土壤物理学主要领域进展与展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1071–1087.

PENG Xinhua, WANG Yunqiang, JIA Xiaoxu, GAO Weida, ZHANG Zhongbin, YAO Rongjiang, ZHAO Ying, SHEN Chongyang, CHEN Dingjiang, ZHU Qing, GAO Lei. Some Key Research Fields of Chinese Soil Physics in the New Era: Progresses and Perspectives [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1071–1087.

新时代中国土壤物理学主要领域进展与展望*

彭新华¹, 王云强², 贾小旭³, 高伟达⁴, 张中彬¹, 姚荣江¹, 赵英⁵,
沈重阳⁴, 陈丁江⁶, 朱青⁷, 高磊¹

(1. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2. 中国科学院地球环境研究所, 西安 710061; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 中国农业大学土地科学与技术学院 北京, 100083; 5. 鲁东大学资源与环境工程学院, 烟台 264025; 6. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 7. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 在近 20 年的发展中, 我国土壤物理学得到迅速发展, 在国际土壤物理学期刊发文量占比从 5% 上升到 30%, 主要研究聚焦在土壤水文过程与尺度转换、土壤物理质量与可持续农业、水热盐迁移与生态调控、以及污染物迁移与模型模拟等领域。本文综合分析这些领域的研究现状与进展, 指出这些进展既有国家需求的驱动, 也有新技术新方法的应用, 以及与相邻学科交叉融合, 最后展望了这些领域的研究重点。论文还指出我国土壤物理学面临科研原创性不足、仪器设备研制滞后等挑战, 同时也面临粮食安全和生态环境安全等国家需求迫切解决的机遇。

关键词: 土壤物理质量; 土壤水文过程; 污染物迁移; 土壤盐渍化; 模型模拟

中图分类号: S152.4 **文献标志码:** A

Some Key Research Fields of Chinese Soil Physics in the New Era: Progresses and Perspectives

PENG Xinhua¹, WANG Yunqiang², JIA Xiaoxu³, GAO Weida⁴, ZHANG Zhongbin¹, YAO Rongjiang¹, ZHAO Ying⁵, SHEN Chongyang⁴, CHEN Dingjiang⁶, ZHU Qing⁷, GAO Lei¹

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, CAS, Nanjing 210008, China; 2. Institute of Earth Environment, CAS, Xi'an, 710061, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 4. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 5. School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China; 6. College of Environmental and Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 7. Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China)

Abstract: In the recent 20 years, soil physics in China has developed fast, and contributed the papers published in high-reputed international journals from 5% up to 30%. These researches mainly focus on soil hydrological processes and scaling transform, soil physical quality and sustainable agriculture, water-heat-salt transport and ecological regulation, contaminants transport and

* 国家自然科学基金项目(41725004) Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41725004)

作者简介: 彭新华(1972—), 男, 湖南茶陵人, 博士, 研究员, 研究方向: 土壤物理与水文过程。E-mail: xhpeng@issas.ac.cn

收稿日期: 2020-02-28; 收到修改稿日期: 2020-04-29; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-05-07

numeric modeling. This paper reviewed the state of the art of these four fields, and pointed out knowledge gaps and future perspectives. These developments result not only from national demands, applications of new technology and methodology, but also from the integration and convergence of multi-disciplines. Although soil physics in China has made a great achievement, she faces the shortage of original researches and the weakness of instrument development. One the other hand, she has many opportunities to develop further as solving the requirements from food security and ecological environment security.

Key words: Soil physical quality; Soil hydrological process; Contaminant transport; Soil salinization; Model simulation

1 我国土壤物理学科发展现状

土壤物理学是土壤学的基础学科分支之一, 主要研究土壤物理性质和物理过程的科学。进入 21 世纪以来, 我国土壤物理学发展迅速, 尤其是近 5 年来中国土壤学会土壤物理学专业委员会会议的参会人数从 2014 年 230 人发展到 2019 年 440 人, 参会单位百余家。土壤物理会议专题主要涉及: 土壤水文过程与尺度转换, 土壤物理质量与可持续农业, 土壤水热盐耦合过程与调控, 污染物迁移与数值模拟等内容。近期, 世界土壤科学联合会议 (WCSS) 涉及土壤物理学科主要在土壤结构和土壤水两大领域, 比如 2018 年在巴西里约召开 WCSS 会议, 有关土壤物理领域的主题包括: 土壤结构动态变化与模拟, 人为排水系统-保持土壤功能与保护水资源, 养分与污染物迁移, 土壤物理在水土保持和食品安全中的作用。可见, 国内土壤物理学专题既涵盖了国际土壤物理学内容, 又突出国内特色, 注重国家需求相结合, 研究内容更为丰富, 涉及面更加宽广。

几年来, 国内外也有关于土壤物理学进展的综述。在庆祝 2015 年国际土壤年时, 李保国等^[1]发表了《土壤物理学发展现状与展望》一文, 回顾了土壤结构、土壤水分监测与运动模拟、农田水文过程与水分生产力、土壤中污染物和胶体的迁移、土壤生物物理、生物质炭对土壤物理性质作用机制与效应等六个领域的研究进展, 这些领域体现了当时的研究热点。在纪念美国土壤学会成立 75 周年, 美国科学院院士 Jury 领衔, 与国际土壤物理学家合作提出土壤物理学 8 个研究挑战^[2]: 包括尺度转换、确定有效性性质、土壤结构与功能、非稳态流、土壤斥水性、土壤-植物系统水分与溶质运移、土壤微生物多样性的物理与生态起源、土壤生态服务功能等, 这些反映了当前土

壤物理学基础科学问题, 有的甚至是土壤物理学难啃的“骨头”。在迎接国家自然科学基金委 (NSFC) 成立 30 周年之际, 宋长青等^[3]组织一些学者撰写了《土壤科学三十年: 从经典到前沿》, 其中一章是《土壤物理学》, 基于文献计量方法分析了国际与国内土壤物理学的发展特征、演进过程、发展动力剖析、NSFC 对中国土壤物理学发展的贡献、以及面临的挑战等。

根据 Web of Science 核心合集数据, 选择了以土壤物理为主的刊物, 包括 *Vadose Zone Journal*、*Soil and Tillage Research*、*Catena* 和 *Journal of Soil and Water Conservation* 等四种期刊, 检索时间为 2001—2018 年, 一共发表 9 109 篇论文, 其中中国学者发表了 1 389 篇。我国土壤物理学 SCI 论文在 21 世纪呈现快速上升趋势, 而美国则在 2008 年以后表现平稳甚至略有下降, 至 2014 年以来我国与美国在这四种期刊中发文量基本持平 (图 1)。从单篇引用次数来看, 我国由于在 2001—2010 年发文较少 (279 篇), 而美国为 1 696 篇, 我国单篇平均引用次数为 41 次, 反而高于美国的 31 次。在 2011—2018 年阶段, 我国发文 1 110 篇, 平均引用次数为 14 次,

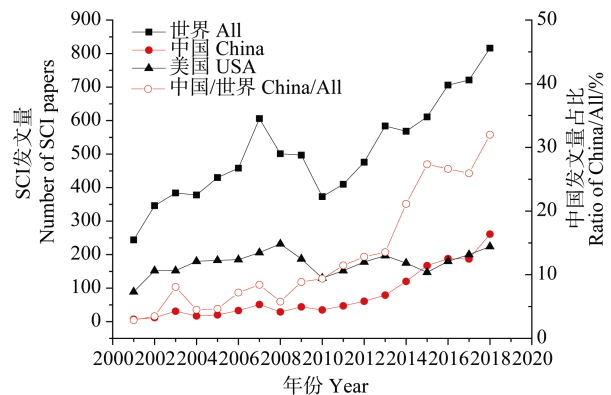


图 1 2001—2018 年中国和美国在四种期刊中的发文量与比例

Fig. 1 The number of SCI papers published by China and by the United States in the four journals from 2001 to 2018 and their contributions to the global

美国在同一时间发文量为 1 453 篇，平均引用次数 11 次。但是，在 2001—2018 年所有论文中，引用次数前 50 篇论文中来自中国学者的仅 3 篇。可见，我国土壤物理论文数量与质量同步提升很快，但是有影响力的文章还是偏少。这些数据分析基于上述四种刊物，存在以偏概全，但是可反映总体趋势。在国际上，传统上欧美国家的土壤学存在明显的萎缩状态，特别是 2008 年美国金融危机削弱了经费资助，而中国的土壤学（包括土壤物理学）在经费大力支持下反而快速发展，在国际上属于异军突起的学科队伍。

2 主要研究领域进展

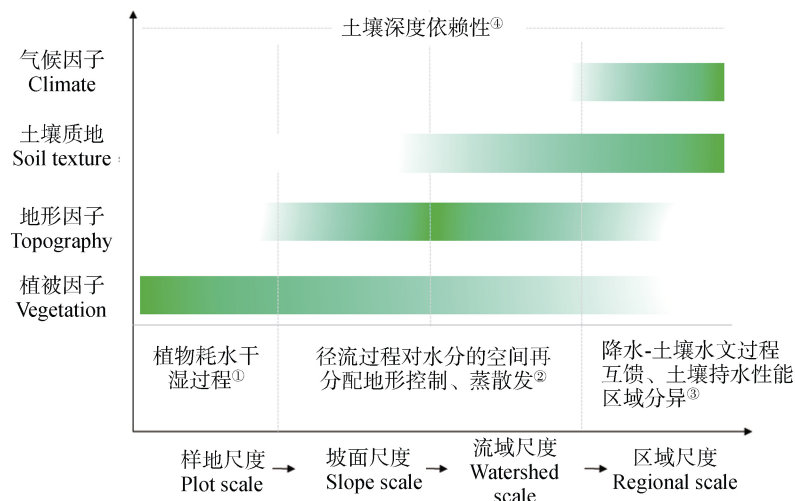
近几年，我国土壤物理专业委员会会议专题主要涉及：土壤水文过程与尺度转换，土壤物理质量与可持续农业，土壤水热盐耦合过程与调控，污染物迁移与数值模拟等，这些专题反映了我国土壤物理学主要研究领域。

2.1 多尺度土壤水文过程与尺度转换

土壤水是土壤物理的核心内容之一，土壤水分运动是土壤物理过程的主要驱动力。土壤水文过程的时间和空间异质性受到自然环境和人为因素的共同影响，同时土壤水文过程存在尺度效应^[4]（图 2）。关于

不同尺度下土壤水文过程的时空特征与影响因子研究取得显著进展。样地尺度是土壤水文过程的基本单元，开展样地尺度土壤水文过程研究，在试验控制、样品采集和原位监测等方面具有一定优势^[5]，可为深入认识长时间序列和更大尺度下土壤水文过程提供基础^[6]。研究表明，土壤水分存在一定的小尺度空间结构，这种空间结构可影响生态系统的物质循环和能量转换。小流域作为一个完整的水文响应单元，坡面产流汇入各级支流或干流，包括蒸发、入渗、侧渗等过程，其景观格局与土壤水文过程相互作用的机理复杂，是土壤水文过程时空异质性研究的重要尺度，也是进行水土资源调控和生态环境建设的基本尺度^[7]。区域尺度包含多个小流域，甚至多个大、中型流域，其景观格局和生态水文过程更加复杂多变，植被、土壤、地形、气候和人类活动等因素间相互作用也更加剧烈^[8-9]。与小流域相比，区域尺度的土壤水文过程研究着重从宏观角度分析其对区域气候、土壤和土地利用等地理分布因子的响应与反馈。随着尺度的进一步上升，比如，在国家或全球尺度，土壤水文过程与降水时空格局、水资源储量与通量、植被生长与物候特征等的研究也备受关注，研究手段由观测逐渐过渡到模型与模式^[10-11]。

土壤水文过程时空分异的主控因子随空间尺度的变化而变化。在样地尺度，土壤水文过程主要受



①Wet and dry processes caused by plant water consumption; ②Spatial redistribution of soil moisture caused by runoff, topography and evapotranspiration; ③Interaction between precipitation and soil hydrological process, and regional pattern of soil water holding capacity; ④Depth dependent soil moisture.

图 2 不同尺度土壤水分时空变化主控过程

Fig. 2 The main control process of the temporal-spatial variation of soil moisture at different scales

微地形和植被的影响。植被是土壤水分消耗的途径之一, 植被耗水及根系分布影响土壤水分的数量和空间异质性^[5]。Tahir 等^[12]研究发现, 南方红壤关键带坡耕地土壤水分时空分异特征主要受植被类型和坡位的影响。受植物蒸腾和降水的影响, 喀斯特峰丛洼地土壤水分具有明显的季节变化特征, 一年中可分为相对稳定期、消耗期和补给期 3 个阶段^[13]。此外, 砾石的存在也可对样地尺度土壤水文过程产生显著影响^[14]。在小流域尺度, 土地利用类型和土壤理化性质的分布以及地形因素对土壤水文过程的时空异质性起着主导作用^[15]。王云强等^[16]发现黄土关键带小流域 0~5 m 土壤水分在水平和垂直方向均表现出明显的空间异质性, 是土地利用方式、植被类型、土壤质地等多因素综合作用的结果。在区域尺度, 气候、土壤、土地利用管理等对土壤水文过程具有重要影响。基于 1983—2012 年农田土壤水分长期观测数据研究表明, 我国北方农田生态系统 4—10 月生长季 0~50 cm 土壤水分在过去 30 年呈显著下降趋势^[17], 其主要原因是施肥管理、高耗水作物种植和气候暖干化的共同影响。Zhu 等^[18]基于土芯钻探和数值计算, 发现面积 37 万 km², 平均厚度 55 m 的深厚黄土包气带存储了 3.1 万亿 m³ 土壤水, 80% 的水分布在 400~600 mm 降水量带, 主要与包气带厚度和土壤持水性能有关。区域尺度土壤水文过程观测研究往往需要较高的物力和人力投入, 随着技术和方法的不断进步, 基于卫星、遥感和模式的集成技术手段逐渐被应用到区域尺度土壤水文过程及其空间异质性的研究^[8, 19-20]。此外, 在红壤丘陵区^[21]、黄土高原地区^[22]、西南喀斯特地区^[23]、高寒草甸区^[24]、西北荒漠区^[25]等开展的土壤水分研究也表明, 随着土层深度的增加, 土壤水分时间变异性减弱, 而空间变异性增大, 即土壤水分的时空变异性具有对土壤深度的依赖性。由此可见, 土壤水文过程的时空异质性及其影响因素均具有尺度依赖性和深度依赖性。

由于土壤和水文过程的非线性, 尺度转换是土壤水文过程研究的难点和热点之一, 包括尺度上推和尺度下推, 其转换途径包括分形理论、小波分析、分布式水文模型等^[26]。以自相似性为基础的分形理论, 通过分维数反映特征空间分布的变化状态、趋势和复杂程度, 能较好地描述土壤水文过程的线状特征, 但这种自相似性只存在于一定的尺度阈值内,

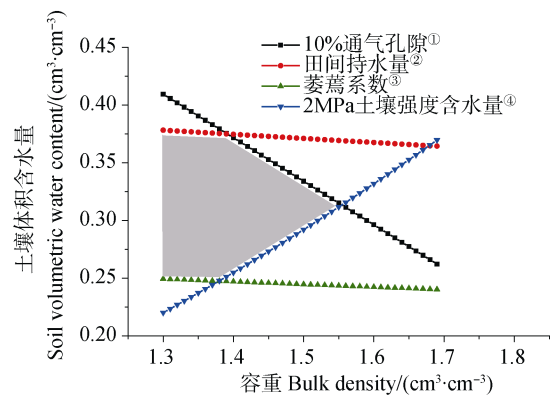
适用范围有限; 小波分析适于多尺度时空数据的尺度转换与优化; 分布式水文模型方法需定量分析找出水文信息在不同尺度之间进行转换的模型结构与主要参数。此外, 时间稳定性理论也被用于土壤水分尺度转换研究, 通过定量分析某一研究区土壤水分空间变异格局在时间上的相似性, 确定能够代表研究区平均土壤水分状况的样点, 明确代表性样点的特征及影响因子, 进而实现尺度上推或下推^[22, 27]。随着新理论和新技术的发展, 水文过程尺度转换途径更加丰富, 转换的精度也不断提高, 其核心是尺度转换函数的确定。未来土壤水文过程尺度转换的研究应加强不同尺度数据的观测、集成与融合, 并结合多种数学手段, 建立普适性强的尺度转换函数。需要注意的是, 随着全球气候变化和人类活动影响的加强, 植被-土壤作用深度延伸至深部土壤, 深部土壤水循环过程及动力学机制已成为土壤水分运动研究中的核心科学问题之一, 是土壤水循环研究的最薄弱环节, 而如何考虑空间和深度的不均匀性是未来土壤水文过程尺度转换的重要方向之一。

2.2 土壤物理质量与可持续农业

农业是人类生存的基础, 是人类社会发展的压舱石。然而, 面对资源不断匮乏, 生态环境恶化, 全球气候等问题, 发展可持续性农业是未来现代农业的必经之路。国际可持续农业机构指出可持续农业的主要目的是不损害后代需求的情况下满足当代人对粮食和纺织品的需求。可持续农业要求农业生产过程中水资源浪费和生态环境污染最小化、肥料利用率最大化。土壤是地球表面能够生长绿色植物的疏松表层。因此, 保持良好的土壤质量是可持续农业中关键的一环。土壤质量指土壤所具有的保持植物生长、净化水源和为植物和动物提供栖息的能力^[28]。土壤质量可以分为土壤物理质量、土壤化学质量和土壤生物质量。土壤作为有生命的自然资源, 近年来土壤质量概念发展到土壤健康。土壤健康定义为土壤作为由生命的生态系统, 为支撑植物和动物生产力, 维持和提高水和大气质量, 促进植物、动物和人类健康等的能力^[29]。美国农业部对土壤健康的定义为土壤作为至关重要的有生命的生态系统, 为植物、动物和人类提供可持续支撑的能力, 也指土壤质量^[30]。无论是从土壤质量还是土壤健康的角度, 土壤物理质量或者土壤物理健康的内涵未发生本质变化, 对植物生长具有直接作用。土壤物

理质量评价主要利用与土壤-植物-大气中的物质能量交换有关的土壤物理性质或指标体系来进行^[31]。同时利用土壤物理模型预测其变化对于未来粮食生产和生态环境的影响，以制定和评估农业可持续发展的策略。土壤结构与物质和能量在土壤中运输、传导和根系生长有密切的关系。因此，土壤的可持续性通常建立在良好的土壤结构上^[32]。土壤容重是表征土壤物理质量最常用的指标之一。土壤容重过高将抑制作物根系的生长，导致作物大幅度减产；土壤容重过低不利于土壤保持水分和根系与土壤紧密接触，容易造成种子萌发受阻和作物倒伏^[33-34]。土壤紧实度，反映土壤强度的重要指标，是土壤容重和土壤含水量的函数，也显著影响作物生长。Whalley 等^[35]发现小麦干物质重量随着土壤穿透阻力的增加而线性下降，并指出无论干旱或压实导致，土壤紧实度均是作物生产力的重要限制因子。土壤团聚体是土壤中重要的结构体，其粒径分布和稳定性对土壤可持续利用有显著影响。一方面，良好土壤团聚性能促进土壤碳的固定和有机质积累，从而降低温室气体排放，改善土壤化学及生物质量，进而促进作物生长^[36]。另一方面，团聚体粒径分布影响土壤中孔隙直径分布，对土壤的持水性能和透水通气性具有显著的影响。对于雨养农业，土壤水分主要来自于降雨。土壤水力特性在一定程度上决定了未来极端降雨条件下雨养农业的可持续性。土壤水分特征曲线是说明其水力性状的重要指标。基于土壤水分特征曲线，Dexter^[31]提出曲线的拐点的斜率作为评价土壤物理质量的 S 指数，并指出该指数较容重更好地反映作物生长。Sinha 等^[37]报道 S 值与土壤容重、饱和导水率、团聚体稳定性等物理指标以及玉米和小麦产量均呈显著的相关性，可有效定量不同环境下土壤物理质量。不同的土壤物理指标分别从不同的方面表征土壤物理质量，但不同指标间往往存在内在的联系。比如，土壤强度不但受土壤容重的影响，也受土壤含水量的影响，因此有学者尝试提出综合多个参数的指标。da Silva 等^[38]综合土壤容重、土壤强度，土壤通气性、土壤水分有效性等参数，提出了作物生长最小限制水分范围 (Least limiting water range, LLWR)，如图 3 所示。LLWR 越大，说明作物在该土壤中所抵御水分胁迫、缺氧胁迫和机械阻力的能力越强。随后，LLWR 被广泛地应用于评价土壤结构对作物生长的影响。

Benjamin 等^[39]报道美国中部大平原实验站小麦产量与 LLWR 呈极显著关系。土壤压实往往降低了 LLWR，而种植覆盖作物可以提高 LLWR，并且这一变化在黏壤土中较砂土中更加明显^[40]。以上指标多表征田块至土块以及团聚体尺度的土壤物理质量，对毫米以下尺度土壤孔隙特征的特征未涉及。Rabot 等^[41]比较了不同土壤物理指标，认为土壤孔隙特征比如大孔隙度和孔隙连通性等与土壤的功能最相关，越来越多的文献也表明土壤的三维孔隙特征可以显著改变作物根系构型，同时也可以很好地预测土壤导水导气等参数^[42-43]。



①Air-filled porosity of $0.1 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; ②Field capacity, ③Wilting point and ④Soil penetration resistance of 2 MPa

图 3 不同土壤容重下的最小限制水分范围 (阴影部分, 改自 da Silva et al., 1994)

Fig. 3 The least limiting water range (LLWR) under different soil bulk densities (shaded part indicates LLWR, Modified from da Silva et al., 1994)

土壤物理质量受耕作方式影响深刻。20 世纪 30 年代美国受到“黑风暴”的影响开启了保护性耕作方面的研究。随后美国、加拿大和巴西等国家采用保护性耕作技术以保护土地的可持续生产力，是一次对传统耕作方式的变革。保护性耕作，或者说保护性农业，遵循三个原则：一是尽量减少土壤扰动，二是至少 30% 的地表被作物或者秸秆覆盖，三是作物轮作或间作。保护性耕作对土壤物理质量的作用存在两种观点^[44]。有研究表明，保护性耕作能够增加土壤有机质含量，团聚体的稳定性和蚯蚓数量，减少土壤侵蚀，有利于保持完整的土壤孔隙，提高土壤水分入渗和持水能力^[45]。但也有一些研究这发现保护性耕作使土壤容重增加，土壤饱和导水率下降，根系受到的穿透阻力提高^[46]。两种相反的观点的出

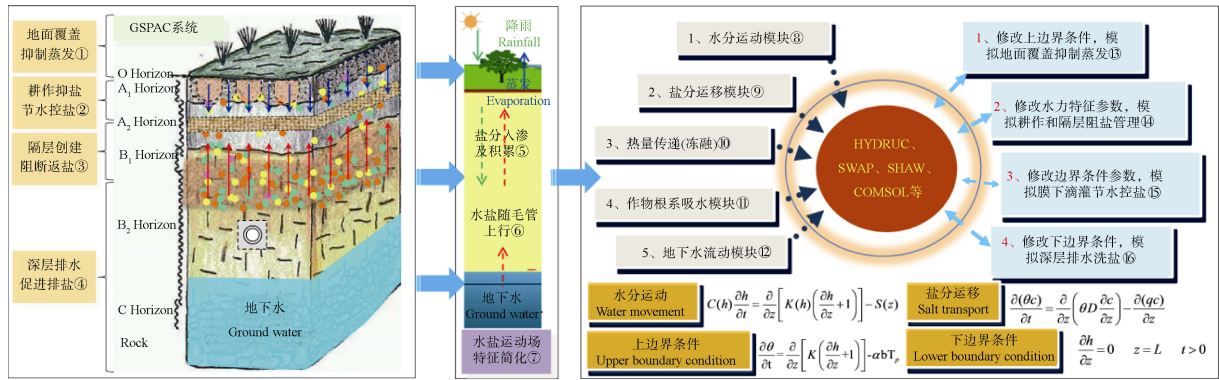
现可能与耕作实验实施年限和土壤质地等有关^[47]。Pittelkow 等^[48]分析了全球 610 个研究案例, 5 463 个对比数据, 发现仅采用少免耕往往使作物减产, 只有与作物覆盖和轮作等措施相结合, 在干旱区域提高作物产量较为明显。因此, 采用保护性耕作措施要因地制宜。另一方面, 深耕(包括深松、深翻等)是提高土壤物理质量的耕作措施, 通过深耕, 提高土壤耕层厚度, 降低土壤容重, 提高土壤固碳能力, 增加土壤透水通气性, 利于作物根系生长, 从而实现作物增产增效^[49]。无论是保护性耕作还是深耕, 耕作措施改变土壤物理质量效果显著, 但是采取何种适宜的耕作措施需要综合考虑当地气候特征、土壤状况和种植制度等。

2.3 水热盐运移耦合过程与生态调控

盐渍地是我国重要的后备耕地资源, 达 3 千多万公顷, 其改良利用与水热盐运移过程密切相关^[50]。土壤水盐迁移过程是指在自然、人为等多种因素影响下水分和盐分在土壤中的再分配过程。温度与土壤水盐运移耦合研究是剖析不同气候带土壤盐渍化发生演变的重要基础, 国内外学者通过大量试验研究和理论分析, 从水热盐耦合运移的角度阐述了土壤盐渍化形成机理、演变规律与驱动机制。Nassar 等^[51]综合考虑水分梯度、温度梯度、溶质梯度作用下的水汽输送、热量传递和溶质运移过程, 对一维水、盐、热运移进行了模拟, 并在封闭土柱中进行了验证和分析; 万良兴等^[52]阐述了近 20 年来土壤水、热、盐运移基本理论的发展过程和国内外学者的研究成果, 评价了目前的土壤水热盐运移模型。总体而言, 温度通过间接影响土壤水汽运动、冻融过程进而影响盐分的迁移与分布。近年来的咸水结冰灌溉, 其利用低温时咸水结冰, 融化时含盐分高的冰先融化入渗, 含低浓度的微咸水后融化起到洗盐的作用, 使土壤表层脱盐^[53]。目前, 国内外学者在冻融、覆膜、秸秆覆盖等管理条件下的土壤水盐运移开展大量的工作, 但在不同种植方式、水文气候条件下温度对水盐运移影响的程度、范围、效应等方面仍需要进一步研究。比如, 以往研究覆盖对减少灌溉用水的影响, 但是很少关注地膜通过减少蒸发以及增加降水的深层渗滤将雨水存储在土壤中的积极作用。不同气候带土壤盐渍化演变的复合驱动机制是盐渍土改良利用的核心科学问题。

土壤水盐运移受区域性气候蒸发力、地形高差、

地下水埋深、土壤自身属性和盐源分布的影响, 因而田间管理措施对水盐迁移有着重要的影响, 也成为优化调控的首选。目前, 土壤水盐运移生态调控措施多种多样, 包括各种具有节水减肥、绿色增效特色的水利工程、物理、化学、农艺等多种措施, 但其核心主要通过降低土壤温度或减少蒸发进而抑制盐分上行、改善土壤结构促进盐分淋洗、隔层创建阻滞盐分上行, 或增加土壤排水加快土壤排盐等途径实现土壤水盐运移过程的调控(图 4)。不同形成原因、驱动机制下的水盐运动调控措施需要针对不同生物气候带和不同盐渍化发生区域的实际情况进行确定。水利工程措施如暗管排水通过增加净入渗方式加速土壤盐分从下边界的淋洗与排出, 有效降低土壤含盐量^[54], 但大量研究表明暗管排水需要通过后期控制排水, 减少土壤水分和养分的淋失^[55]。物理调控措施主要通过耕作、客土、秸秆隔层、生物质炭、铺沙压碱等方法创建疏松隔层抑制盐分上行, 或加速土壤盐分向深层次淋洗等方式实现水盐调控。化学调控措施主要通过环境友好型的钙基材料的应用, 利用 Ca^{2+} 与土壤胶体 Na^+ 交换并淋洗, 降低土壤胶体中的交换性钠 Na^+ , 调节改善土壤理化性状和生物学性状^[56]。此外, 生物调控措施主要利用保护性耕作方式、或者通过微生物促进土壤团粒结构的形成与保存, 提升盐碱地有机质含量, 同时阻控土壤返盐^[57]。在当今生态优先的背景下, 生物改良措施已成为研究的热点。受水资源因素制约, 目前国际上对盐碱地治理没有更好的办法, 单一的调控措施在不同区域适用条件有别, 由此一些侧重于因地制宜的综合调控措施改进工作备受关注。例如, 雷宏军等^[58]提出的曝气滴灌水肥一体化技术, 通过将大量微气泡与水肥同步输送到根区而改善作物微环境, 明显提升了作物生产潜力。张博^[59]提出的一种地下排水系统与田间入渗工程相结合的基础措施, 并辅施有机肥料和改良剂的综合改良方法, 改良后表土积盐情况得到有效缓解, 土壤养分有效提升。从已有研究看, 随着近年来气候变化、水资源短缺以及极端气候频繁, 不同气候区土壤水盐运动异质性与气候、地形、灌排管理等因素长期并存, 局部盐渍化减缓与持久性的反复和加剧并存, 这对传统的饱和带水盐运动理论和水盐调控思路提出了新的挑战, 未来研究应重点突破非饱和带水盐迁移过程、驱动机制及其尺度效应, 微咸水/咸水、农田排水等非传统水资源在盐



①Surface cover inhibits evaporation; ②Tillage and water-saving to control salinization; ③Create an interlayer to inhibit salt accumulation on the surface soil; ④Deep drainage promotes salt-leaching; ⑤Salt infiltration and accumulation; ⑥Water and salt go up by capillary rising; ⑦Simplified characteristics of water and salt movement; ⑧Water movement module; ⑨Salt transport module; ⑩Heat transfer (freeze-thaw); ⑪Root water absorption module; ⑫Groundwater flow module; ⑬Modify upper boundary conditions to simulate surface cover inhibiting evaporation; ⑭Modify hydraulic characteristic parameters to simulate tillage and interlayer blocking capillary; ⑮Modify boundary condition parameters to simulate water saving and salt control by drip irrigation under film; ⑯Modify lower boundary conditions to simulate deep drainage and salt-leaching.

图 4 土壤水热盐耦合迁移的调控途径及其过程模拟

Fig. 4 The regulation approach and process simulation of coupled soil water, heat and salt transport

渍土安全利用及其生态效应等。

土壤中溶质的运动包括对流、分子扩散、机械弥散、溶解沉淀、离子吸附、植物吸收等一系列物理、化学和生物过程。土壤溶质运移模型是近似描述盐渍土水热盐运移规律的有效、快捷方法，可归纳为：机理性模型，物理模拟模型及数学模拟模型^[60]。Nassar 等^[51]于 1992 年提出了描述非恒定条件下水、热、盐运动的控制方程，其中包括水分、热运动和溶质运移 3 个子方程，这也是目前土壤水热盐耦合运移数学模拟的基础。HYDRUS 模型^[60]被广泛用于模拟饱和-非饱和渗流区水、热及多种溶质的迁移与转化过程，能够较好地模拟田间点源交汇条件下的水-盐-热分布。尤其是，HYDRUS 模型引入了能模拟优势流的双孔隙模型，可进行物理非平衡和化学非平衡溶质运移的模拟（例如两区模型、两点模型等），这为土壤结构和层次复杂条件下溶质迁移模拟提供了方便^[61-62]。Qi 等^[63]利用 HYDRUS 模型准确模拟了秸秆覆盖和滴灌条件下的土壤水盐运移过程。此外，SHAW 模型亦广泛用于研究土壤水热盐耦合运移，尤其是在冻融条件下。Lu 等^[64]利用 SHAW 模型模拟不同覆盖条件下全年土壤水热盐耦合运移过程，并对当地秋浇提出了理论指导。近年来，一种基于有限元理论的数值仿真模型 COMSOL 被用于模拟地下水流动、土壤盐分运移和气流形成规律等问题，

Wang 等^[65]利用 COMSOL 研究了盐土路基膨胀中的土壤盐分迁移、结晶等过程。焦会青等^[66]结合 COMSOL 构建的模型较好地模拟了绿洲盐渍化土壤中多离子耦合运移过程。与现有其他模型相比，尽管 COMSOL 目前主要局限于地下水和土壤水入渗的研究，但是其数值分析能力强、计算适用性广，且具备复杂工程设置方式和二次开发潜力，因此在一些特定的土壤溶质运移过程模拟研究中具有广泛应用前景。总体来看，目前在地下水-土壤-植物-大气连续体（GSPAC）水分传输模型研究中，对提高作物水分利用率极为关键的根区水分传输机理的认识仍不够深入。尤其是，由于盐分的影响，明确 GSPAC 系统水分转化机制相当困难。近年来，环境或人为加入稳定同位素技术已经成为研究植物水资源利用的新方法^[67]，这为进一步揭示 GSPAC 系统土壤水与溶质运移过程提供了有效手段。总体上，水、热、盐耦合运移模型有了很大发展，然而现有模型存在如参数多、田间可操作性差、难以验证等很多不足。未来的主要研究热点是将数学模型和机理性模型相结合。

2.4 污染物迁移与模型模拟

针对我国土壤和水体污染形势严峻问题，土壤物理学依托学科优势，围绕土壤污染物的迁移转化规律及其模拟模型开展了广泛研究，关注的污染物

包括氮磷、重金属、有机大分子等溶质态污染物,以及病毒、细菌、纳米材料等尺寸在 1 nm 到 10 μm 之间的胶体污染物。土壤溶质运移研究始于 19 世纪末,关于氮磷、重金属、有机物等污染物运移研究则起始于 20 世纪六七十年代。土壤污染物的运移途径包括对流、扩散、弥散以及胶体携带等,并受吸附-解吸、酸-碱反应、沉淀、溶解、络合、氧化-还原反应等化学、物理化学、生物转化过程影响。在 20 世纪 90 年代发现放射性核素钚可通过胶体携带方式在地下环境中进行超长距离迁移后^[68],胶体携带污染物迁移的研究受到重视。21 世纪以来,纳米材料在土壤中的迁移成为了新的研究热点^[69]。研究纳米材料的迁移不仅对有毒纳米材料的环境风险评估十分重要,而且对采用纳米零价铁等纳米材料原位修复受污染的土壤具有十分重要的意义^[70]。2013 年以来,土壤中抗生素抗性基因的迁移转化过程逐步受到关注^[71]。

对土壤及地下水中污染物迁移转化过程的研究主要依赖于室内模拟试验、田间观察、模型模拟等三种手段。应用土柱模拟、田间观察等手段,我国在土壤水分、质地、结构等物理性质对重金属、氮磷、抗生素、胶体态污染物等迁移转化过程的影响研究方面取得了积极进展。已有的研究表明,干湿交替条件下六价铬浓度随着氧化还原电位的波动而上下波动,土壤中有效态铬浓度和重金属铬的迁移/淋溶能力显著高于淹水条件^[72]。在淹水环境下,土壤中的氮磷因向上覆水中迁移而损失,且随着淹水历时的延长,氮磷损失率呈增加趋势。因此,农作物受淹后可根据实际情况采取控制排水措施,减少地表水的排放,以减少氮磷流失^[73]。相比于大水漫灌,控制灌溉、干湿交替灌溉等技术可以有效削减农田氮磷的流失^[74]。土壤水分过程一方面决定了土壤好氧厌氧环境和氧化还原电位,从而影响氮磷的形态转化过程等过程,另一方面驱动了土壤溶解态氮磷的垂向和横向运移^[75]。由于壤中流的存在,坡地土壤氮磷等污染物垂直迁移形态呈现地表径流、壤中流和地下径流不同的分层特征^[76]。对土壤中抗生素抗性基因迁移转化过程的一些研究表明,不同质地土壤对抗生素抗性基因的吸附和持留能力存在较大差异,抗生素抗性基因可以在水分饱和的土壤中运输相当长的距离^[77]。对土壤胶体态污染物的运移过程研究结果表明,与土壤溶质的吸附和解吸

机制不同,土壤胶体吸附和解吸受重力沉降、拦截、布朗扩散、水动力和 DLVO (Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek) 力的控制,土壤表面非均质性被发现是影响 DLVO 力从而影响胶体吸附和解吸的关键因素^[78]。纳米尺度粗糙凸起不仅有利于胶体吸附,同时在环境条件发生变化时还有利于胶体解吸,表面电荷异质性则有利于胶体的不可逆吸附。

对集水区/流域尺度的研究,主要关注土壤氮磷流失过程,并取得了积极进展,特别是对紫色土、红壤地区等的研究。由于紫色土土层薄、耕作频繁、土壤相对疏松,紫色土小流域氮素主要以可溶态形式流失,磷素迁移则以颗粒态为主,壤中流是氮流失的主要水文过程,强降雨对于氮磷流失的影响显著^[78-79]。对红壤为主的浙江椒江流域氢氧和氮氧稳定同位素的分析结果表明,慢速壤中流和地下水对河流流量的贡献达到 75% 以上,地下水(约 50%)和土壤氮(> 30%)是河流中硝氮的主要来源^[80]。对红壤丘陵区的长沙金井流域研究结果也表明,由于大面积种植水稻会导致浅层地下水氨氮污染,提高地下水硝态氮和总氮浓度,基流的硝态氮和总氮流失贡献分别高达大于 27% 和大于 21%,尤其在水稻种植面积比例高的流域和水稻休耕期^[81]。对华北平原地下水硝酸盐氮氧同位素的研究表明,地下水硝酸盐主要来源于有机肥和污水,而不是化肥^[82]。土壤氮磷流失的尺度效应得到关注,已有的一些研究表明由于沟渠、堰塘的截留作用以及农田排水重复利用,使得氮磷流失强度随着集水区/流域面积的增加总体呈现降低趋势,但也有一些研究得到了相反的结论。目前,对尺度效应形成机制缺少系统研究,对不同空间尺度下土壤氮磷流失主导因素以及响应关系的变化规律尚不清楚。

数学模型是当前定量认识土壤污染物迁移转化过程的主要手段。前述用于盐分运移的确定性模型、随机模型和传递函数模型也被广泛用于土壤污染物迁移的模拟。总体而言,当前应用于氮磷、农药等迁移转化过程的模型主要包括:田间/坡面尺度模型 SOILN、EPIC、DNDC 等和流域尺度模型 SWAT、HSPF、ANSWERS、GBNP、HBV-N、TVGM、HYPE 等^[83-84]。尽管以上田间模型被广泛应用于土壤氮、PFCs 等的迁移转化过程模拟,但是更多的研究通过耦合土壤水文模型与生物地球化学反应模型,模拟分析土壤污染物的迁移转化特征。例如,赖晓明等^[85]

耦合 HYDRUS-1D 和 DNDC 模型模拟太湖流域农田系统水分渗漏和氮磷淋失特征。李龙飞等^[86]耦合水动力学和化学反应动力学模型描述土壤硝态氮的迁移和转化过程。基于集水区/流域尺度的模拟模型研究发展迅速，其中 SWAT 模型逐步成为运用最为广泛。从研究内容上看，主要聚焦在污染物流失负荷、模型优化以及径流变化和土壤属性对流失负荷的影响，并开始关注气候变化的影响，以及不同类型污染物在不同尺度下的精细化模拟与管理^[83]。

总体而言，我国土壤污染物迁移转化过程及其模拟模型方面取得了重要进展。从研究尺度上看，逐步从常规的土柱和田间尺度向更微观的分子和纳米尺度和更宏观的集水区和流域尺度双向发展（图 5）。随着 X-射线 CT、同步辐射技术、透射电镜等技术的应用，深化了对土壤结构及其过程的微观认知，促进了对土壤物理性状与污染物迁移转化响应关系的微观机制认识。但是，土壤水分、结构、质地等物理性状对污染物的固、液、气、生物多界面行为

过程机制尚缺乏系统研究，有关土壤结构对污染物多过程耦合的微观调控机制及其定量预测模型将是未来重要研究的重点。微流控技术应用于模拟多孔介质物理环境，并结合先进成像与数值模拟技术，为传统上被视为“黑箱”的土壤过程提供了新的研究工具与思路^[87]。现有的流域/集水区尺度模型主要是依据欧美发达国家的实践发展起来的，许多过程描述和经验参数难以适用我国国情，且存在所需数据和参数多、时间和空间平均化处理、经验参数/关系替代机理过程、验证困难等诸多不足^[83]。通过多技术、多方法、多尺度协同研究，特别是应用大数据、人工智能、星地传感、深度学习等技术^[88]，深入理解和系统描述区域/流域尺度土壤物理过程（特别是水文过程）及其驱动的污染物迁移转化过程，实现现有模型参数的本国化，构建适合我国实际的新模型，突破污染物迁移转化过程的尺度效应、滞后效应以及关键源区识别的关键问题，将是未来研究重点。

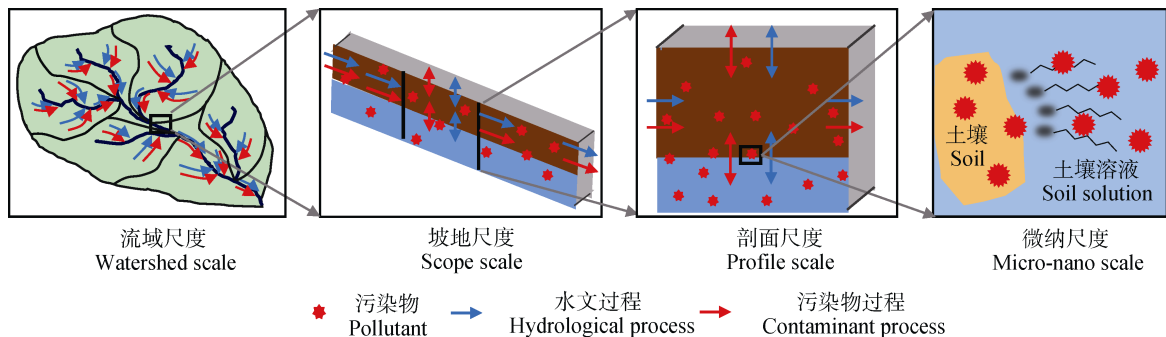


图 5 不同空间尺度土壤水文与污染物迁移转化耦合过程

Fig. 5 Coupled processes of soil hydrology and pollutant migration and transformation at different spatial scales

3 土壤物理学发展驱动力

进入 21 世纪以来，我国土壤物理学取得了长足进展。从土壤物理学的研究对象来看，从过去土壤静态物理性质，包括土壤结构、水分、机械物理性质等，演变到重视机理探讨、过程分析、模型构建等综合研究。从土壤物理学的服务对象来看，从单纯的农业生产拓展到更为综合、复杂的生态环境问题。纵观这些进展，可以发现，土壤物理学发展动力来自于国家需求的驱动，也有来自于学科交叉的延伸；有来源于研究尺度的拓展，也有来源于新技术和新方法的采用。主要表现在以下几个方面：

3.1 国家需求的驱动

3.1.1 粮食安全与农业可持续发展 我国耕地面积 1.22 亿公顷，占世界耕地 7%，养活了世界上 20% 的人口。同时，我国耕地质量总体偏低，2/3 耕地属于中低产田，酸化、盐渍化、结构板结、有机质低和养分不均衡等制约了我国粮食产能。基于我国人口众多，耕地面积小的国情，粮食安全是我国安国之本。国家一直非常重视我国粮食安全，中央一号文件毫不放松抓好粮食生产，相继提出实施“藏粮于地、藏粮于技”计划。土壤物理学家积极推动了我国中低产田改良与地力提升等研究。在长期集约化和重种轻养的模式下，我国农田土壤质量与健康

水平已经严重制约了国家的粮食安全、生态环境安全和国民健康,土壤健康保护和耕地质量建设工作也将继续推进我国农业绿色发展。

3.1.2 污染土壤治理与修复 随着我国工业化、城市化、农业高度集约化的快速发展,土壤污染日益加剧。2014年环境保护部和国土资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,全国土壤总体污染物点位超标率16.1%,耕地点位超标率高达19.4%,重度污染耕地面积高达300多万公顷。为此,国家非常重视土壤污染阻控与修复,相继出台一系列重要政策与法规,2016年国家颁布实施的《土壤污染防治行动计划》(简称“土十条”)和2018年出台的《中华人民共和国土壤污染防治法》。国家重视与社会需求大力推动了我国污染物在土壤迁移转化、溯源和阻控修复的研究快速发展,土壤物理学在该领域,特别是污染物迁移、模型模拟与预测方面发挥自身学科的特长。

3.1.3 水土流失与生态保护 我国受季风气候影响,雨季旱季分明,雨季水土流失严重,旱季农业用水匮乏,加之我国不同区域地形、成土母质等具有很大差异性,形成具有区域特色的水土流失和生态保护研究。水土流失依然是我国生态保护与治理重点关注的问题,我国仍有超过国土面积1/4的水土流失面积,黄土高原地区、东北黑土区、南方红壤区、西南喀斯特地区等区域水土流失问题依然突出。随着全球气候变化和人类活动影响的加剧,青藏高原高寒地区也面临着十分严峻的土壤退化与水土流失问题。土壤物理学队伍积极参与土壤水分运动、旱地农业用水、土壤侵蚀等相关研究。

3.2 新技术新方法的应用

3.2.1 计算机断层扫描(CT)技术 土壤CT技术能够快速、无损地获取土壤孔隙三维结构。CT技术由Petrovic等^[89]引入到土壤科学中来,近10年随着CT设备和图像分析快速升级,该技术日益成为土壤物理研究的重要手段。目前,医用CT、工业CT和同步辐射CT等多种设施可以从团聚体到土体等多个尺度进行土壤孔隙结构定量化^[90],这为揭示土壤中物理过程及其与生物、化学过程的耦合提供了契机。应用CT技术,研究内容主要集中在耕作和施肥等措施对土壤孔隙结构的影响^[91],土壤结构对作物根系生长^[92]、土壤动物活动^[93]、以及土壤水分运动^[43]等的影响。尽管CT技术在定量土壤三维结

构方面得到了长足的发展,但是土壤是一个极其复杂的多孔介质,目前还有很多问题有待深入研究,其中有两个比较突出的问题:一是如何更准确、客观和便捷地表征土壤的孔隙结构;二是如何在多尺度下将土壤孔隙结构特征对物质迁移转化的影响进行精确的数学表达。随着CT设备普及和图像分析软件快速升级,这一技术将是揭开“土壤黑箱”物理过程的有力工具。

3.2.2 地球物理探测技术 近年来,地球物理探测技术在坡面、集水域和小流域等尺度的土壤物理性质探测中得到了广泛的应用。常用地球物理探测工具包括大地电导率仪(EMI),电阻率层析成像仪(ERT)和探地雷达(GPR)等。这些地球物理探测工具都是基于监测特定土壤的物理参数(如电导率、介电常数、温度等)并构建物理或经验模型,反演土壤结构和水分状况等物理性质。EMI通过发射线圈产生随时间和深度变化的初级磁场并诱导出次级磁场,从而测定土壤表观电导率并构建其与土壤水分、盐分、质地等性质定量关系,实现土壤物理性质的反演^[94]。ERT探测方法通过在土壤中插入电极(温纳或施伦贝格模式)并测定电极间电阻率的变化,构建土壤不同维度的电阻率空间分布,并通过电阻率的地下空间分布信息可视化反演土壤物理性质的分布^[95]。GPR的原理是不同介电常数的物质对电磁波的散射作用,通过地面记录电磁波的散射信号,可视化判别土壤中不同物质(如水分、岩石、根系等)的分布^[96]。

3.2.3 示踪技术 示踪技术是追踪物质在“土壤-植物-大气连续体”系统中迁移路径的有效方法,在土壤物理研究中的应用领域得到很大拓展。环境同位素是最为常用的示踪剂^[97],地球化学离子^[98]、稀土元素^[99]、甚至温度等环境变量^[100]在一定条件下均可用于土壤物理过程示踪。基于氢氧同位素的水分来源解析是目前最为活跃的领域之一,可有效解决植物耗水策略、流域径流组分解析、壤中产流机制和地下水补给路径等^[101-102]等。稀土元素示踪方法在阐明土壤团聚体周转过程方面也得到发展,Peng等^[103]通过利用¹³C同位素和稀土元素双向标记的方法,大幅提高回收率并成功示踪了土壤团聚体周转路径及周期。室内人为添加示踪剂便于控制但难以模拟野外真实环境,如何将室内实验与野外监测有机结合是当前面临的难题。此外,天然示踪

剂存在状态受众多因素影响，如何去除噪音准确评价示踪结果的不确定性也需要考虑。

3.3 土壤物理学与相邻学科交叉

3.3.1 土壤物理学与生物地球化学交叉 土壤物理对生物地球化学循环具有决定性的影响。首先，土壤水是物质输移的关键驱动媒介和驱动力。物质通过溶解于土壤水，随着土壤水分发生侧向和垂向运移，并通过根系水分吸收而迁移到植被中；土壤含水量调控着土壤下渗率，从而决定地表产流和物质迁移^[104]。第二，土壤水分运动分布通过调控土壤氧气含量，作用于氧化还原环境和微生物活动，从而影响生物地球化学循环。研究表明，硝化和反硝化以及土壤异养呼吸等碳氮循环过程，均受到土壤含水量的调控^[75]。第三，土壤温度、质地和容重等物理性质，通过影响土壤生物活动而调控生物地球化学循环。众所周知，土壤微生物活动对土壤物理等因子响应敏感^[105]。通过对植物根系发育产生影响，土壤物理性质也会作用于元素迁移和循环。然而之前研究中，土壤物理对土壤生物地球化学循环的影响常被黑箱化处理，土壤水文模型和碳氮生物地球化学模型也存在各自的缺陷^[106]。因此，土壤物理与生物地球化学交叉方向的发展，对于描述土壤物质输移循环机制并模拟其通量，具有重要意义。

3.3.2 土壤物理学与生态水文交叉 传统土壤物理主要关注土壤特性对水分和物质迁移等非生物过程的影响，而生态水文则以水分对生物过程的影响为出发点。包气带中水分作为连接土壤生物过程和非生物过程的介质^[107]，也因此成为了土壤物理和生态水文交叉的桥梁。植被与水分的互作关系是土壤物理与生态水文学科融合的一个成功案例，水分的时空格局影响植被的分布与群落的生态功能（生态水文），而植被又通过不同的耗水策略影响水分在土壤中的传输（土壤物理）。目前土壤物理的研究正由土柱和田块尺度向流域区域尺度发展，由基础研究为主向基础研究和生态服务并举发展，这为土壤物理与生态水文的融合提供了巨大动力^[108]。

3.3.3 土壤物理学与地球关键带科学交叉 作为地球关键带核心过程，土壤物理不仅决定着物质和能量在土壤中的存储、转化与迁移，也决定着地-气界面、水-陆界面和“土壤-植被-大气”连续体的物质输移循环^[109]土壤物理过程具有极强的水文水循环效应和生态环境效应，通过调控地表关键要素

（如蒸散发、植被水分利用、植被净生产力、温室气体浓度、地表径流、土壤氮素渗漏）的时空格局和演变过程，驱动关键带物质迁移与能量转换，决定水量调节、碳氮平衡、水土保持、粮食安全、水资源利用以及全球变化应对等生态服务功能^[110-111]。然而，土壤物理过程主要侧重非饱和区（渗透区），而土壤水与地下水的交换，地下水运动与溶质迁移等相关研究较少。地球关键带研究拓展了土壤物理学研究范畴，强化了土壤物理过程在陆地表层系统剖面、坡面和流域等多尺度物质运移、循环中的重要作用。

4 我国土壤物理学主要领域的展望

我国土壤物理学虽然发展迅速，队伍不断壮大，在国际上影响力不断提升，但是科研主要集中在少数单位，发展非常不平衡，原创性研究较少，在国际上领先的研究则更加凤毛麟角。这有多方面的原因：其一，我国土壤物理学研究基础薄弱，树立我国土壤物理学在国际上的地位还需要一个较长的时间；其二，国内实验室和野外观测科研仪器设备基本上通过购买于欧美国家来实现，仪器研制与开发能力差，这方面的意识也较弱，大大限制了我国学者率先使用新技术新设备开展原创性研究；其三，从事土壤物理学研究的学者大部分本科毕业于农业资源与利用专业，具有较强的农学知识，但是数理基础不强，在土壤物理过程数值模拟上有突破存在一定的难度。

另一方面，我国幅员广大，地形起伏差异大，气候类型多样，土壤类型和植被类型最为丰富，为我国土壤物理学发展提供了得天独厚的资源。东北黑土退化、黄土高原侵蚀与水分承载力、华北和西北水资源匮乏与盐渍化、青藏高原寒区水土过程、黄淮平原中低产田改良、南方红壤侵蚀与季节性干旱、西南喀斯特石漠化和干旱、滨海带盐碱滩涂综合治理等，这些区域特征为我国土壤物理学提供了独特的科学问题和天然的野外研究平台。根据前面所阐述的4个领域，认为今后需要关注的研究重点如下：

4.1 地球关键带水土过程与服务功能

关键带是我们人类活动的区域，关系到人类生存与福祉，是元素生物地球化学过程最活跃的区域。土壤水作为连接各圈层的纽带，是理解诸如入渗、

蒸发蒸腾、径流、溶质运移等一系列水文过程的重要状态变量。因此,水土过程作为关键带中物质循环的主要载体,今后需要重点研究关键带“水”与“土”过程的相互作用,关键带结构影响水文过程的幅度与通量,水文过程驱动关键带岩石风化、土壤发育和物质迁移转化。运用新技术与新方法,解析关键带水土过程与土壤生产力、生态环境安全等功能的互馈关系,优化和提升关键带服务功能。

4.2 土壤物理健康与现代农业可持续发展

过去长期农业高强度利用,重种轻养,化肥农药大量使用,重金属抗生素等有害物质累积等,导致土壤健康恶化。现代农业强调种养结合,休耕轮作养地。今后需要重点研究保护性耕作、粮食作物与覆盖/固氮作物轮作、绿色有机肥等管理方式土壤物理健康提升的原理与机制,中低产田改良与高产田地力维持的机理,团粒结构形成、演变与功能,土壤物理健康与作物生长的耦合关系,研发与集成土壤物理健康提升的关键技术体系,开展培育健康土壤,实现现代农业可持续发展。

4.3 污染物迁移转化与阻隔修复

我国水体污染、土壤污染等问题非常突出。污染物既包括传统的氮磷面源污染物、重金属和有机污染物、以及病原体、纳米材料、抗生素等新型污染物。从土柱尺度控制模拟到关键带,小流域等尺度田间监测模拟,今后重点研究自然因素和人为活动下土壤物理性状对污染物空间异质性和尺度效应的作用机制,土壤孔隙结构对污染物迁移的影响机制,研究区域尺度污染物迁移路径、通量和溯源,建立污染物迁移转化模型,为水体污染、土壤污染的控制与修复提供理论基础和技术支撑。

4.4 水热盐耦合过程与生态调控

盐渍土是我国主要的后备耕地资源。当前,不同气候带土壤盐渍化演变驱动机制与生态调控机理是盐渍土改良利用的核心科学问题。随着近年来气候变化、水资源短缺以及极端气候频繁,对传统的饱和带水盐运动理论和水盐调控思路提出了新的挑战,今后重点研究非饱和带水盐迁移过程、驱动机制及其尺度效应,微咸水/咸水、农田排水等非传统水资源在盐渍土安全利用及其生态效应,土壤水盐运移物理模型与尺度转换,盐渍化进程对土壤功能的影响机制,耕作与工程排水控盐技术集成等。未来盐渍土的改良更加突出节水减肥生态低能耗。

总而言之,基于我国人口众多,资源匮乏的基本国情,未来粮食安全与生态环境安全仍然十分严峻。土壤物理学充分发挥自身学科优势,积极参与我国“藏粮于地、藏粮于技”战略和“绿水青山就是金山银山”生态文明建设,服务国家需求,聚焦学科前沿,为国民经济和人类福祉贡献力量。

参考文献 (References)

- [1] Li B G, Ren T S, Liu G, et al. Soil physics: Present and future[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30 (Z1): 78—90. [李保国, 任图生, 刘刚, 等. 土壤物理学发展现状与展望[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30 (Z1): 78—90.]
- [2] Jury W A, Or D, Pachepsky Y, et al. Kirkham's legacy and contemporary challenges in soil physics research[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75 (5): 1589—1601.
- [3] Song C Q. Advances in the frontiers of soil sciences[M]. Beijing: The Commercial Press, 2016. [宋长青. 土壤学若干前沿领域研究进展[M]. 北京: 商务印书馆, 2016.]
- [4] Vanderlinden K, Vereecken H, Hardelauf H, et al. Temporal stability of soil water contents: A review of data and analyses[J]. Vadose Zone Journal, 2012, 11(4): vzt2011.0178.
- [5] Bachmair S, Weiler M, Troch P A. Intercomparing hillslope hydrological dynamics: Spatio-temporal variability and vegetation cover effects[J]. Water Resources Research, 2012, 48(5): w05537, <https://doi.org/10.1029/2011wr011196>.
- [6] Jiang N, Shao M A, Hu W, et al. Characteristics of water circulation and balance of typical vegetations at plot scale on the Loess plateau of China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70 (1): 157—166.
- [7] Li X Y. Mechanism of coupling, response and adaptation between soil, vegetation and hydrology in arid and semiarid regions [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2011, 41 (12): 1721—1730. [李小雁. 干旱地区土壤-植被-水文耦合、响应与适应机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41 (12): 1721—1730.]
- [8] Joshi C, Mohanty B P. Physical controls of near-surface soil moisture across varying spatial scales in an agricultural landscape during SMEX02[J]. Water Resources Research, 2010, 46(12): . <https://doi.org/10.1029/2010wr009152>.
- [9] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Large-scale spatial variability of dried soil layers and related factors across the entire Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2010, 159 (1/2): 99—108.
- [10] Guillod B P, Orlowsky B, Miralles D G, et al. Reconciling spatial and temporal soil moisture effects on afternoon rainfall[J]. Nature Communications, 2015, 6: 6443.

- [11] Scanlon B R, Zhang Z Z, Save H, et al. Global models underestimate large decadal declining and rising water storage trends relative to GRACE satellite data[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(6): E1080-E1089. <https://doi.org/10.1073/pnas.1704665115>.
- [12] Tahir M, Lü Y, Gao L, et al. Soil water dynamics and availability for *Citrus* and peanut along a hillslope at the Sunjia Red Soil Critical Zone Observatory(CZO)[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 163: 110—118.
- [13] Zhang C, Chen H S, Nie Y P, et al. Dynamics of soil profile water content in peak-cluster depression areas in Karst region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(10): 1225—1232. [张川, 陈洪松, 聂云鹏, 等. 喀斯特地区洼地剖面土壤含水率的动态变化规律[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(10): 1225—1232.]
- [14] Zhang Y H, Zhang M X, Niu J Z, et al. Rock fragments and soil hydrological processes : Significance and progress[J]. Catena, 2016, 147: 153—166.
- [15] Green T R, Erskine R H. Measurement and inference of profile soil-water dynamics at different hillslope positions in a semiarid agricultural watershed[J]. Water Resources Research, 2011, 47(12): 1—16. <https://doi.org/10.1029/2010wr010074>.
- [16] Wang Y Q, Shao M A, Hu W, et al. Spatial variations of soil water content in the critical zone of the Chinese loess plateau[J]. Earth and Environment, 2016, 44(4): 391—397. [王云强, 邵明安, 胡伟, 等. 黄土高原关键带土壤水分空间分异特征[J]. 地球与环境, 2016, 44(4): 391—397.]
- [17] Liu Y L, Pan Z H, Zhuang Q L, et al. Agriculture intensifies soil moisture decline in Northern China[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 11261.
- [18] Zhu Y J, Jia X X, Qiao J B, et al. Capacity and distribution of water stored in the vadose zone of the Chinese loess plateau[J]. Vadose Zone Journal, 2019, 18(1): 180203.
- [19] McColl K A, Alemohammad S H, Akbar R, et al. The global distribution and dynamics of surface soil moisture[J]. Nature Geoscience, 2017, 10(2): 100—104.
- [20] Mohanty B P, Cosh M, Lakshmi V, et al. Remote sensing for vadose zone hydrology-A synthesis from the vantage point[J]. Vadose Zone Journal, 2013, 12(3): vzj2013.07.0128.
- [21] Gao L, Peng X H, Biswas A. Temporal instability of soil moisture at a hillslope scale under subtropical hydroclimatic conditions[J]. Catena, 2020, 187: 104362.
- [22] Jia X X, Shao M G, Wei X R, et al. Hillslope scale temporal stability of soil water storage in diverse soil layers[J]. Journal of Hydrology, 2013, 498: 254—264.
- [23] Li X Z, Xu X L, Liu W, et al. Similarity of the temporal pattern of soil moisture across soil profile in Karst catchments of southwestern China[J]. Journal of Hydrology, 2017, 555: 659—669.
- [24] Zhu X C, Shao M A, Jia X X, et al. Application of temporal stability analysis in depth-scaling estimated soil water content by cosmic-ray neutron probe on the northern Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 299—308.
- [25] Li X D, Shao M G, Zhao C L, et al. Spatial variability of soil water content and related factors across the Hexi Corridor of China[J]. Journal of Arid Land, 2019, 11(1): 123—134.
- [26] Peng L, Su C J, Xu Y, et al. Research progress on the problems of scale in hydrology and hydrologic scaling[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(3): 179—184. [彭立, 苏春江, 徐云, 等. 水文尺度问题及尺度转换研究进展[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(3): 179—184.]
- [27] Jia X X, Shao M G, Zhang C C, et al. Regional temporal persistence of dried soil layer along south-north transect of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2015, 528: 152—160.
- [28] Reitsma K D, Schumacher T E, Clay D E. Soil quality[M].//Alternative Practices for Agronomic Nutrient and Pest Management in South Dakota. South Dakota State: Darrell Deneke, 2011: 1—8.
- [29] Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality[J]. Applied Soil Ecology, 2000, 15(1): 3—11.
- [30] <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/>
- [31] Dexter A R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. Geoderma, 2004, 120(3/4): 201—214.
- [32] Peng X H, Horn R, Hallett P. Soil structure and its functions in ecosystems: Phase matter & scale matter[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 146: 1—3.
- [33] Chen G H, Weil R R. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 117: 17—27.
- [34] Hamza M A, Anderson W K. Soil compaction in cropping systems[J]. Soil and Tillage Research, 2005, 82(2): 121—145.
- [35] Whalley W R, Watts C W, Gregory A S, et al. The effect of soil strength on the yield of wheat[J]. Plant and Soil, 2008, 306(1/2): 237—247.
- [36] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79(1): 7—31.
- [37] Sinha N K, Chopra U K, Singh A K, et al. Soil physical quality as affected by management practices under maize-wheat system[J]. National Academy Science Letters, 2014, 37(1): 13—18.
- [38] da Silva A P, Kay B D, Perfect E. Characterization of the

- least limiting water range of soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58 (6): 1775—1781.
- [39] Benjamin J G, Nielsen D C, Vigil M F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production[J]. Geoderma, 2003, 116 (1/2): 137—148.
- [40] Safadoust A, Feizee P, Mahboubi A A, et al. Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system[J]. Agricultural Water Management, 2014, 136: 34—41.
- [41] Rabot E, Wiesmeier M, Schlüter S, et al. Soil structure as an indicator of soil functions: A review[J]. Geoderma, 2018, 314: 122—137.
- [42] Luo L F, Lin H, Schmidt J. Quantitative relationships between soil macropore characteristics and preferential flow and transport[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74 (6): 1929—1937.
- [43] Zhang Z B, Liu K L, Zhou H, et al. Linking saturated hydraulic conductivity and air permeability to the characteristics of biopores derived from X-ray computed tomography[J]. Journal of Hydrology, 2019, 571: 1—10.
- [44] Alvarez R, Steinbach H S. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104 (1): 1—15.
- [45] West T O, Post W M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66 (6): 1930—1946.
- [46] Gao W D, Whalley W R, Tian Z C, et al. A simple model to predict soil penetrometer resistance as a function of density, drying and depth in the field[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155: 190—198.
- [47] Blanco-Canqui H, Ruis S J. No-tillage and soil physical environment[J]. Geoderma, 2018, 326: 164—200.
- [48] Pittelkow C M, Liang X Q, Linquist B A, et al. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture[J]. Nature, 2015, 517 (7534): 365—368.
- [49] Schneider F, Don A, Hennings I, et al. The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know?[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 174: 193—204.
- [50] Yang J S, Yao R J, Management and efficient agricultural utilization of salt-affected soil in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(Z1): 162—170. [杨劲松, 姚荣江. 我国盐碱地的治理与农业高效利用[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30 (Z1): 162—170.]
- [51] Nassar I N, Horton R, Globus A M. Simultaneous transfer of heat, water, and solute in porous media: II. experiment and analysis[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56 (5): 1357—1365.
- [52] Wan L X, Tian J C, Zheng Y Y, et al. Advance of research on theory and model of coupling transportation of water, heat and salt in soil[J]. Water Saving Irrigation, 2007 (3): 22—25. [万良兴, 田军仓, 郑艳艳, 等. 土壤中水、热、盐耦合运移机理与模型的研究进展[J]. 节水灌溉, 2007 (3): 22—25.]
- [53] Guo K, Liu X J. Effect of initial soil water content and bulk density on the infiltration and desalination of melting saline ice water in coastal saline soil[J]. European Journal of Soil Science, 2019, 70 (6): 1249—1266.
- [54] Jafari-Talukolaee M, Ritzema H, Darzi-Naftchali A, et al. Subsurface drainage to enable the cultivation of winter crops in consolidated paddy fields in northern Iran[J]. Sustainability, 2016, 8 (3): 249.
- [55] Darzi-Naftchali A, Shahnazari A. Influence of subsurface drainage on the productivity of poorly drained paddy fields[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 56: 1—8.
- [56] Sastre-Conde I, Lobo M C, Beltrán-Hernández R I, et al. Remediation of saline soils by a two-step process: Washing and amendment with sludge[J]. Geoderma, 2015, 247/248: 140—150.
- [57] Devkota M, Martius C, Gupta R K, et al. Managing soil salinity with permanent bed planting in irrigated production systems in Central Asia[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 202: 90—97.
- [58] Lei H J, Zang M, Zhang Z H, et al. Impact of working pressure and surfactant concentration on air-water transmission in drip irrigation tape under cycle aeration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30 (22): 63—69. [雷宏军, 臧明, 张振华, 等. 循环曝气压力与活性剂浓度对滴灌带水气传输的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30 (22): 63—69.]
- [59] Zhang B. Study on the technology in efficiently improving the northern coastal saline soil[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013. [张博. 北方滨海盐土高效改良技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.]
- [60] Šimunek J, van Genuchten M T. Contaminant transport in the unsaturated zone[M]//The Handbook of Groundwater Engineering, 2nd ed. Boca Raton, State of Florida: CRC Press, 2006: 22-1-22-46.
- [61] Beven K J. Preferential flows and travel time distributions: Defining adequate hypothesis tests for hydrological process models[J]. Hydrological Processes, 2010, 24 (12): 1537—1547.
- [62] Yao R J, Yang J S, Zheng F L, et al. Estimation of soil salinity by assimilating apparent electrical conductivity data into HYDRUS model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35 (13): 91—101. [姚荣江, 杨劲松, 郑复乐, 等. 基于表观电导率和 Hydrus 模型同化的土壤盐分估算[J]. 农业工程学报, 2019, 35 (13): 91—101.]
- [63] Qi Z J, Feng H, Zhao Y, et al. Spatial distribution and

- simulation of soil moisture and salinity under mulched drip irrigation combined with tillage in an arid saline irrigation district, northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 201: 219—231.
- [64] Lu X H, Li R P, Shi H B, et al. Successive simulations of soil water-heat-salt transport in one whole year of agriculture after different mulching treatments and autumn irrigation[J]. *Geoderma*, 2019, 344: 99—107.
- [65] Wang D Y, Liu J K, Li X. Numerical simulation of coupled water and salt transfer in soil and a case study of the expansion of subgrade composed by saline soil[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 143: 315—322.
- [66] Jiao H Q, Sheng Y, Zhao C Y, et al. Modeling of multiple ions coupling transport for salinized soil in oasis based on COMSOL[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(15): 100—107. [焦会青, 盛钰, 赵成义, 等. 基于 COMSOL 软件的绿洲盐渍化土壤中多离子耦合运移模型构建[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(15): 100—107.]
- [67] Beyer M, Koeniger P, Gaj M, et al. A deuterium-based labeling technique for the investigation of rooting depths, water uptake dynamics and unsaturated zone water transport in semiarid environments[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 627—643.
- [68] Kersting A B, Efurud D W, Finnegan D L, et al. Migration of Plutonium in ground water at the Nevada Test Site[J]. *Nature*, 1999, 397(6714): 56—59.
- [69] Dai C M, Shen H, Duan Y P, et al. Review on the transportation of nanomaterials in soil and groundwater environment[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(3): 236—242, 248. [代朝猛, 沈晖, 段艳平, 等. 土壤和地下水环境中纳米材料迁移的研究进展[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(3): 236—242, 248.]
- [70] Yue Z K, Zhou Q X. Application of nanomaterials to remediation of soil contaminated by organic pollutants: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(10): 1929—1937. [岳宗恺, 周启星. 纳米材料在有机污染土壤修复中的应用与展望[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(10): 1929—1937.]
- [71] Zhang N, Li M, Liu X. Distribution and transformation of antibiotic resistance genes in Soil[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(7): 2609—2617. [张宁, 李森, 刘翔. 土壤中抗生素抗性基因的分布及迁移转化[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(7): 2609—2617.]
- [72] Rong Q, Luo D Y, Bian P Y, et al. The research progress on migration and transformation of chromium in soil[J]. *Sichuan Environment*, 2018, 37(2): 156—160. [容群, 罗栋源, 边鹏洋, 等. 土壤中铬的迁移转化研究进展[J]. *四川环境*, 2018, 37(2): 156—160.]
- [73] Yang J W, Tang G M, Li R Z, et al. Loss of nitrogen and phosphorus from soil and surface water in flooded cropland[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(12): 71—77. [杨继伟, 汤广民, 李如忠, 等. 受淹农田土壤-上覆水氮磷迁移特征模拟研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(12): 71—77.]
- [74] Gao X, Zhang T Y. Research progress of nitrogen leaching and control methods in farmland soil[J]. *Agricultural Engineering*, 2019, 9(3): 99—103. [高薪, 张婷瑜. 农田土壤氮素淋失阻控方法研究进展[J]. *农业工程*, 2019, 9(3): 99—103.]
- [75] Zhu Q, Castellano M J, Yang G S. Coupling soil water processes and the nitrogen cycle across spatial scales: Potentials, bottlenecks and solutions[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 187: 248—258.
- [76] Mo M H, Tu A G, Song Y J. A review of nitrogen transportation response to soil hydrological processes in slope land[J]. *Environmental Science Survey*, 2017, 36(6): 1—4. [莫明浩, 涂安国, 宋月君. 坡地氮素输移特征及其对土壤水文过程响应研究述评[J]. *环境科学导刊*, 2017, 36(6): 1—4.]
- [77] Shen C Y, Jin Y, Zhuang J, et al. Role and importance of surface heterogeneities in transport of particles in saturated porous media[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2020, 50(3): 244—329.
- [78] Zhang S L, Shi X J, Guo T. Dynamic change of phosphorus leaching of neutral purple soil at different Re-wetting rate[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2014, 35(3): 1111—1118. [张思兰, 石孝均, 郭涛. 不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化[J]. *环境科学*, 2014, 35(3): 1111—1118.]
- [79] Cao R X, Liu J, Deng K K, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses and runoff in a typical purple soil watershed in the Three Gorges reservoir area[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(12): 5330—5339. [曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 等. 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征[J]. *环境科学*, 2019, 40(12): 5330—5339.]
- [80] Hu M P, Liu Y M, Zhang Y F, et al. Coupling stable isotopes and water chemistry to assess the role of hydrological and biogeochemical processes on riverine nitrogen sources[J]. *Water Research*, 2019, 150: 418—430.
- [81] Wu J S, Li Y, Li Y Y, et al. Controlling mechanisms and technology demonstrations of agricultural non-point source pollution in subtropical catchments[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(6): 1009—1019. [吴金水, 李勇, 李裕元, 等. 刘济亚热带区域农业面源污染流域源头防控机理与技术示范[J]. *农业现代化研究*, 2018, 39(6): 1009—1019.]
- [82] Wang S Q, Wei S C, Liang H Y, et al. Nitrogen stock and leaching rates in a thick vadose zone below areas of long-term nitrogen fertilizer application in the North

- China Plain: A future groundwater quality threat[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 576: 28—40.
- [83] Chen D J, Shen H, Hu M P, et al. Legacy nutrient dynamics at the watershed scale: Principles, modeling, and implications[M]//*Advances in Agronomy*. America: Elsevier, 2018: 237—313.
- [84] Gao Y, Yu G R. Biogeochemical cycle and its hydrological coupling processes and associative controlling mechanism in a watershed[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73 (7): 1381—1393. [高扬, 于贵瑞. 流域生物地球化学循环与水文耦合过程及其调控机制[J]. *地理学报*, 2018, 73 (7): 1381—1393.]
- [85] Lai X M, Liao K H, Zhu Q, et al. Feature analysis of soil water leakage and leaching of nitrogen and phosphorus in the typical farmland of Taihu lake basin based on Hydrus-1D model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24 (9): 1491—1498. [赖晓明, 廖凯华, 朱青, 等. 基于 Hydrus-1D 模型的太湖流域农田系统水分渗漏和氮磷淋失特征分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24 (9): 1491—1498.]
- [86] Li L F, Zhang J Q, Li J M, et al. Study of real-time prediction of soil nitrate transport and transformation based on ensemble Kalman filter[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2018, 51 (10): 868—875. [李龙飞, 张嘉琪, 李金敏, 等. 基于集合卡尔曼滤波的土壤硝态氮迁移转化实时预测方法研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2018, 51 (10): 868—875.]
- [87] Bultreys T, de Boever W, Cnudde V. Imaging and image-based fluid transport modeling at the pore scale in geological materials: A practical introduction to the current state-of-the-art[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 155: 93—128.
- [88] Shen C P. A transdisciplinary review of deep learning research and its relevance for water resources scientists[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54 (11): 8558—8593.
- [89] Petrovic A M, Siebert J E, Rieke P E. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46 (3): 445—450.
- [90] Helliwell J R, Sturrock C J, Grayling K M, et al. Applications of X-ray computed tomography for examining biophysical interactions and structural development in soil systems: A review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2013, 64 (3): 279—297.
- [91] Zhou H, Peng X H, Perfect E, et al. Effects of organic and inorganic fertilization on soil aggregation in an Ultisol as characterized by synchrotron based X-ray micro-computed tomography[J]. *Geoderma*, 2013, 195/196: 23—30.
- [92] Tracy S R, Black C R, Roberts J A, et al. Quantifying the effect of soil compaction on three varieties of wheat (*Triticum aestivum* L.) using X-ray Micro Computed Tomography (CT) [J]. *Plant and Soil*, 2012, 353 (1/2): 195—208.
- [93] Bottinelli N, Zhou H, Capowiez Y, et al. Earthworm burrowing activity of two non-Lumbricidae earthworm species incubated in soils with contrasting organic carbon content (Vertisol vs. Ultisol) [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53 (8): 951—955.
- [94] Zhu Q, Lin H, Doolittle J. Repeated electromagnetic induction surveys for determining subsurface hydrologic dynamics in an agricultural landscape[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74 (5): 1750—1762.
- [95] Vereecken H, Huisman J A, Hendricks Franssen H J, et al. Soil hydrology: Recent methodological advances, challenges, and perspectives[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51 (4): 2616—2633.
- [96] Guo L, Chen J, Lin H. Subsurface lateral preferential flow network revealed by time-lapse ground-penetrating radar in a hillslope[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50 (12): 9127—9147.
- [97] Gu W Z. *Isotope hydrology*[M]. Beijing: Science Press, 2011. [顾慰祖. *同位素水文学*[M]. 北京: 科学出版社, 2011.]
- [98] Lü Y, Gao L, Geris J, et al. Assessment of water sources and their contributions to streamflow by end-member mixing analysis in a subtropical mixed agricultural catchment[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 203: 411—422.
- [99] Morris E K, Morris D J P, Vogt S, et al. Visualizing the dynamics of soil aggregation as affected by arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *The ISME Journal*, 2019, 13 (7): 1639—1646.
- [100] Huo S Y, Jin M G, Zhu C K, et al. Estimating stable infiltration recharge rate by temperature tracer method[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50 (6): 761—772. [霍思远, 靳孟贵, 朱常坤, 等. 运用温度示踪法确定稳定入渗补给速率[J]. *水利学报*, 2019, 50 (6): 761—772.]
- [101] Penna D, Geris J, Hopp L, et al. Water sources for root water uptake: Using stable isotopes of hydrogen and oxygen as a research tool in agricultural and agroforestry systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 291: 106790.
- [102] Zhao P, Tang X Y, Zhao P, et al. Identifying the water source for subsurface flow with deuterium and oxygen-18 isotopes of soil water collected from tension lysimeters and cores[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 503: 1—10.
- [103] Peng X H, Zhu Q H, Zhang Z B, et al. Combined turnover of carbon and soil aggregates using rare earth oxides and isotopically labelled carbon as tracers[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 109: 81—94.
- [104] Li X Y, Contreras S, Solé-Benet A, et al. Controls of infiltration-runoff processes in Mediterranean Karst rangelands in SE Spain[J]. *Catena*, 2011, 86 (2):

- 98—109.
- [105] Hörtnagl L, Barthel M, Buchmann N, et al. Greenhouse gas fluxes over managed grasslands in Central Europe[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24 (5): 1843—1872.
- [106] Zhu Q, Liao K H, Lai X M, et al. A review of soil water monitoring and modelling across spatial scales in the watershed[J]. *Progress in Geography*, 2019, 38 (8): 1150—1158. [朱青, 廖凯华, 赖晓明, 等. 流域多尺度土壤水分监测与模拟研究进展[J]. *地理科学进展*, 2019, 38 (8): 1150—1158.]
- [107] Banwart S, Bernasconi S M, Bloem J, et al. Soil processes and functions in critical zone observatories: hypotheses and experimental design[J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10 (3): 974—987
- [108] Vereecken H, Schnepf A, Hopmans J W, et al. Modeling soil processes: Review, key challenges, and new perspectives[J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15 (5): vzt2015.09.0131.
- [109] Guo L, Lin H. Critical zone research and observatories: Current status and future perspectives[J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15 (9): vzt2016.06.0050.
- [110] Hatfield J L, Sauer T J, Cruse R M. *Soil[M]//Advances in Agronomy.America: Elsevier*, 2017: 1—46.
- [111] Shang J Y, Zhu Q, Zhang W. Advancing soil physics for securing food, water, soil and ecosystem services[J]. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17 (1): 180207.

(责任编辑：檀满枝)