

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会
科学出版社

主办
出版

2015

第 52 卷 第 4 期

Vol.52 No.4



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 4 期 2015 年 7 月

目 次

综述与评论

亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物生态学研究进展····· 沈李东 (713)

土壤科学与现代农业

近30年江西省耕地土壤全氮含量时空变化特征····· 赵小敏 邵 华 石庆华等 (723)

北京市土壤重金属潜在风险预警管理研究····· 蒋红群 王彬武 刘晓娜等 (731)

秸秆深还对土壤团聚体中胡敏酸结构特征的影响····· 朱 姝 窦 森 陈丽珍 (747)

生物炭添加对酸化土壤中小白菜氮素利用的影响····· 俞映惊 薛利红 杨林章等 (759)

水肥对高产无性系油茶果实产量的影响····· 张文元 郭晓敏 涂淑萍等 (768)

研究论文

基于VRML的土壤电导率三维空间变异性虚拟现实建模研究····· 李洪义 顾呈剑 但承龙等 (776)

不同样点数量对土壤有机质空间变异表达的影响····· 海 南 赵永存 田 康等 (783)

基于稳定同位素的土壤水分运动特征····· 靳宇蓉 鲁克新 李 鹏等 (792)

中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究····· 吴良泉 武 良 崔振岭等 (802)

不同施肥方式下滩涂围垦农田土壤有机碳及团聚体有机碳的分布····· 候晓静 杨劲松 王相平等 (818)

长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响····· 毛霞丽 陆扣萍 何丽芝等 (828)

不同时期施用生物炭对稻田N₂O和CH₄排放的影响····· 李 露 周自强 潘晓健等 (839)

秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响····· 刘 园 M. Jamal Khan 靳海洋等 (849)

单一电解质体系下恒电荷土壤胶体扩散双电层中滑动层厚度的计算····· 丁武泉 朱启红 王 磊等 (859)

化工厂遗留地铬污染土壤化学淋洗修复研究····· 李世业 成杰民 (869)

离子型稀土矿尾砂地植被恢复障碍因子研究····· 刘文深 刘 畅 王志威等 (879)

辽东与山东半岛土壤中有机氯农药残留特征研究····· 朱英月 刘全永 李 贺等 (888)

长期冬种绿肥改变红壤稻田土壤微生物生物量特性····· 高嵩涓 曹卫东 白金顺等 (902)

豆科间作对番茄产量、土壤养分及酶活性的影响····· 代会会 胡雪峰 曹明阳等 (911)

研究简报

蚕豆根系分泌物中氨基酸含量与枯萎病的关系····· 董 艳 董 坤 汤 利等 (919)

小麦与蚕豆间作对根际真菌代谢功能多样性的影响····· 胡国彬 董 坤 董 艳等 (926)

不同年限毛竹林土壤固氮菌群落结构和丰度的演变····· 何冬华 沈秋兰 徐秋芳等 (934)

长期不同施肥模式下砂姜黑土的固碳效应分析····· 李 玮 孔令聪 张存岭等 (943)

果园生草对¹⁵N利用及土壤累积的影响····· 彭 玲 文 昭 安 欣等 (950)

封面图片: 离子型稀土矿废弃地全景 (由汤叶涛、刘文深提供)

DOI: 10.11766/trxb201411130569

基于稳定同位素的土壤水分运动特征*

靳宇蓉 鲁克新 李鹏[†] 王琦 张铁钢 刘莹

(西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安理工大学教育部西北水资源与环境生态重点实验室, 西安 710048)

摘要 土壤水分受降雨和地下水的共同补给作用, 是陆地水循环的重要环节。通过模拟试验, 结合土壤水同位素特征, 以黄土高原黄绵土为研究对象, 研究降雨入渗和地下水补给方式下土壤水分的运移变化特点。结果表明: 土壤体积含水量随着时间的延长而增大, 最终趋于稳定, 土壤水分的运移有明显滞后效应; 土壤水氢同位素受补给水源、交换混合以及蒸发的影响, 随着时间的延长, 补给水源的影响逐渐减弱, 水分的交换混合和蒸发作用逐渐显现, 土壤水最终达到动态平衡状态; 两种补给条件下, 土壤水运移方式均为活塞式推进, 降雨入渗方式土壤水 δD 随土层深度的增加先减小后增大最终趋于稳定, 表层 0~5cm 土壤水由于蒸发富集重同位素, 5~20cm 土壤水滞留时间最长, 保水能力最强, 地下水补给方式下土壤水 δD 随土层深度的增加而减小, 上层土壤水 δD 由于蒸发富集重同位素, 下层受地下水补给影响贫化; 两种补给方式下土壤水 δD 与 $\delta^{18}O$ 有良好线性关系, 降雨入渗方式土壤水蒸发分馏作用大于地下水补给方式, 地下水补给具有较好的保水效果。

关键词 降雨入渗; 地下水补给; 土壤水分运动; 稳定同位素

中图分类号 S152.7 **文献标识码** A

近年来, 水资源问题一直是国内外重点关注的问题之一。土壤水作为水资源的一种存在形式, 成为国际学者研究的热点之一。土壤水分受降雨入渗、灌溉、蒸发、地下水补给等共同作用, 变化复杂。传统方法主要研究水分在入渗过程中水力参数特点, 利用水力参数建立土壤水运动模型, 例如 Kostiakov 模型、Philip 模型、Green-Ampt 模型等。氢氧稳定同位素可以作为天然示踪剂来研究土壤水的入渗、蒸发以及蒸腾^[1-3], 根据土壤水的氢氧同位素贫富程度可以获得土壤水的运移信息, 揭示土壤水文过程机理。Zimmermann 等^[4] 研究得出稳态条件下土壤水同位素浓度随深度增加呈指数递减趋势。Barnes 和 Allison^[5-7] 研究了非饱和土柱在恒温和非恒温条件下土壤剖面同位素的分布并建立了描述土壤水同位素剖面分布的数学模型, 利用其研究

土壤水分蒸发与蒸腾影响的区别, 植物蒸腾不能引起同位素的分馏, 因此长时间序列的土壤水同位素数据可以用来定量研究土壤水蒸发和蒸腾的比率。土壤水氢氧同位素的变化主要受降雨和蒸发的影响: 在蒸发作用下靠近地表的土壤水氢氧同位素富集重同位素^[5-9]; 降雨入渗补给是影响土壤水同位素组成的重要因素^[10]。一般而言植物蒸腾并不会引起土壤水同位素分馏^[10-12]。水分入渗到土壤中的形式有优先流和活塞流等, 对于不同地区以及不同土壤类型, 入渗方式也不完全一样。入渗方式的不同导致土壤水氢氧同位素特征出现差异性。而影响降雨入渗和土壤水分蒸发有多种因素, 例如土壤颗粒性质^[13]、植被覆盖^[12, 14]、降雨量^[15]等。

国内利用同位素技术探究土壤水分运移以及变化的研究也有很多。田立德等^[16] 对青藏高原中部

* 国家自然科学基金重点项目 (41330858)、国家自然科学基金项目 (41271290)、国家科技支撑计划课题 (2011BAD31B01)、陕西省教育厅科学研究计划项目 (2013JK0847) 共同资助

[†] 通讯作者, E-mail: lipeng74@163.com

作者简介: 靳宇蓉 (1990—), 女, 陕西省宝鸡市人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与生态修复方面研究。E-mail: jinyurong2008@126.com

收稿日期: 2014-11-13; 收到修改稿日期: 2015-03-03

地区降水和土壤水同位素进行了研究,分析了土壤剖面不同深度稳定同位素变化规律以及水分迁移关系。侯士彬等^[17]研究了太行山3种典型植被降雨入渗的稳定同位素特征。邓文平等^[18]通过对北京西山鹫峰低山区的降水、土壤水、泉水氢氧同位素的变化特征分析,研究了该地区降水—土壤水—泉水的转化关系。程立平和刘文兆^[19]对黄土塬区的降水和4种土地利用类型下土壤水的氢氧同位素进行了测定分析,研究了该区深层土壤水稳定同位素的特征及土壤水运动机制。

野外条件有利于研究自然条件下土壤水分运动,但是野外条件变化复杂,难以控制,为了实现研究条件的可控性,包为民等^[13]在室内进行了模拟降雨入渗试验,研究了土壤水氢氧同位素的变化情况。孙晓旭等^[20]选用砂土、黄土两种性质土壤设计了室内蒸发和降水入渗试验,研究了土壤水蒸发与降水入渗非饱和带过程中不同水体氢氧同位素的变化规律。但是,国内外对于黄土区土壤水运动

与氢氧同位素变化规律的探究仍在少数。因此本文采用室内试验模拟的方法,以黄土高原黄绵土为研究对象,探讨水分以降雨积水入渗、地下水补给毛管上升两种方式补给黄绵土后,土壤水的运动以及氢氧同位素变化特征,为研究黄土高原地区土壤水的运移规律提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为取自陕北绥德的黄绵土,土壤机械组成依据美国制划分,见表1。为了排除根系等影响,试验土样经风干后过2 mm筛,按容重 1.3 g cm^{-3} (陕北黄绵土容重)每隔5 cm分层均匀装土,装填时分别在土柱5、20、35、50、65、80 cm处布设美国Spectrum Watchdog 2000在线土壤水分监测仪。土壤初始含水量为3.68%,土壤水初始同位素值为 $\delta\text{D}=-56.30\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}=-7.02\text{‰}$ 。

表1 黄绵土机械组成

Table 1 Mechanical composition of the yellow loamy soil in the experiment (mm, %)

颗粒分级Particle size fractionation	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.05	0.05~0.002	<0.002
含量Content (%)	0	0.06	0.33	5.95	26.40	66.96	0.31

1.2 试验装置与设计

试验装置主要由土柱和供水系统两部分组成,供水系统由入渗供水系统和地下供水系统组成,试验装置详见图1。

供水系统采用改进的马氏瓶自动供水。土柱高为100 cm、内径30 cm的有机玻璃土柱,沿垂向等距离布设6个排取土孔,孔径为2 cm,垂直方向上相邻两排孔中心间距为5 cm。土柱底部10 cm深度内填装粒径为2~5 mm的砂砾石,模拟地下饱和含水层,上部为供试土壤,填装高度为85 cm,两部分之间用透水纱布隔开,以免上层土壤进入砂砾层。

降雨入渗试验装置如图1a示,马氏瓶供水系统定水头供水,水头 $h=2.5 \text{ cm}$,一次供水60 mm;地下水补给试验装置如图1b示,马氏瓶供水系统补给地下水,地下水位 -0.85 m ,持续供水30 d。供水同位素值为 $\delta\text{D}=-70.84\text{‰}$ 、 $\delta^{18}\text{O}=-10.48\text{‰}$ 。试验开始后的第1、3、5、10、15、20、30天分别从土柱表层

5、20、35、50、65、80 cm处采集土壤样品。

试验于2014年3月8日至2014年4月8日,在西安理工大学水文循环实验室进行。自然降雨水样于2014年3月至6月之间采集。所有水样与土样采集后装入玻璃瓶内,水样立即采用美国LGR液态水同位素分析仪测量,土样密封低温保存,土壤水由真空抽提设备处理,再用LGR液态水同位素分析仪测量。为了减少取样时人为干扰,土样采集后采用装填土等体积回填。

1.3 测定方法

采用LGR液态水同位素分析仪,测定并计算抽提出水的 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$,测定精度分别达 0.5‰ 和 0.15‰ 。测得的植物和土壤水样中氢氧同位素含量为“维也纳标准平均海水(VSMOW)”的千分差,表示为:

$$\delta = \frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{VSMOW}}}{R_{\text{VSMOW}}} \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

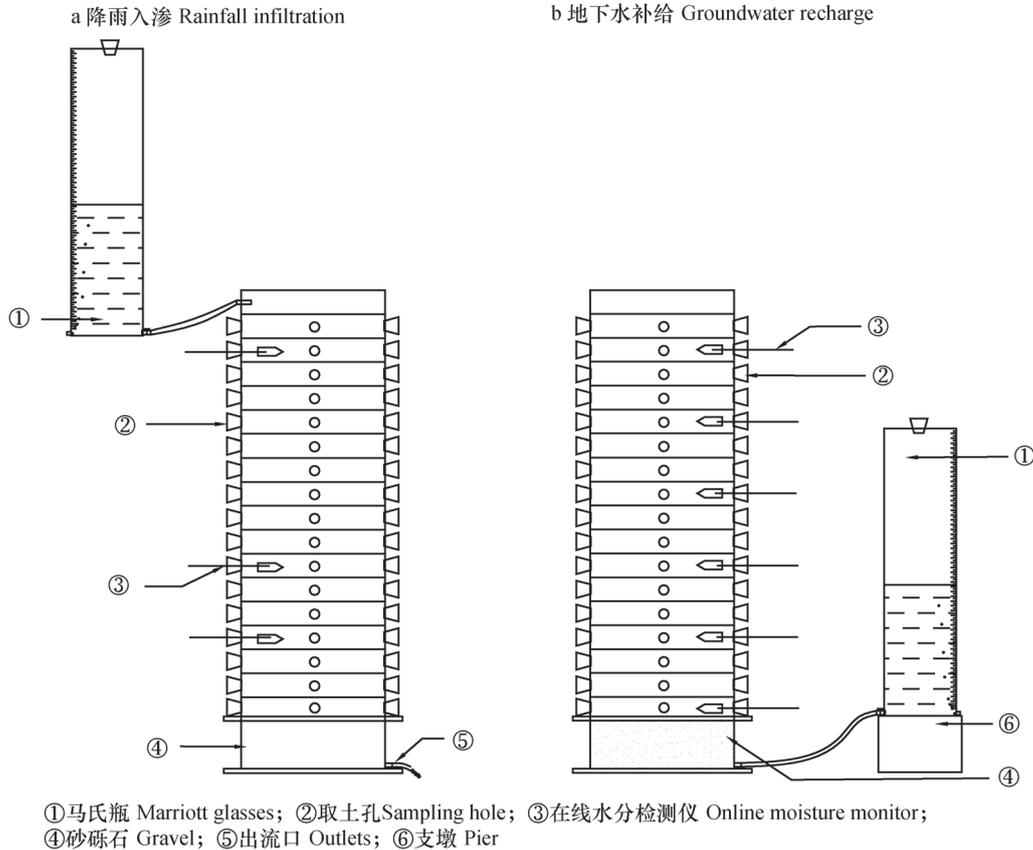


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Sketch of the experimental apparatus

式中, R_{sample} 为水样中D或 ^{18}O 的浓度, 而 R_{VSMOW} 为VSMOW标准水样中D或 ^{18}O 的浓度, $\delta > 0$ 时, 样品较标准“重”, 即富集; 反之 $\delta < 0$, 样品较标准“轻”, 即贫化。LGR液态水同位素分析仪测量1390 nm波长附近的吸收, 计算 ^2HHO , HH^{18}O 和 HHO 分子浓度。分子浓度被转化为原子比率 $^2\text{H}/^1\text{H}$ 和 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 。为了消除记忆效应, 每个样品进行六次注射, 计算时排除前两次数据。此外, 对于样品注射量($2.50 \times 10^{16} \sim 4.50 \times 10^{16}$ 个水分子, 波动范围在 $\pm 3.00\%$ 之间)、温度(变化范围在 1°C 之内)、 δD 以及 $\delta^{18}\text{O}$ 测量精度(标准差分别小于1.2和0.4)进行检查, 不满足条件的测试结果将被排除在计算结果之外。仪器通过测试三个已知的不同R值的标准样品的同位素含量, 拟合出调整公式, 使用调整公式对样品的测量结果进行调整。

2 结果与讨论

2.1 土壤含水量的变化特征

图2a和图2b分别给出了降雨入渗和地下水补给

方式下土壤体积含水量随时间的变化曲线。从图中可以看出, 各深度土壤体积含水量随着时间的延长而增加, 最终趋于稳定。这表明水分的补给方式对土壤含水量整体变化影响不大。

从图2a中可以看出, 土壤体积含水量与土层深度成反比, 土壤体积含水量的增大随着土层深度的增加出现滞后; 图2b中, 土壤体积含水量与土层深度成正比, 土壤含水量的增大随土层深度的减小出现滞后。这说明, 不同补给方式会影响土壤水分运移的方式, 降雨入渗水分从表层向深层迁移, 而地下水补给方式下水分由深层向表层迁移。

对比图2a和图2b, 地下水补给方式下各土层深度土壤体积含水量均大于降雨入渗方式, 且当含水量趋于稳定时, 相同土层深度下, 地下水补给方式下土壤体积含水量是降雨入渗方式的8.4倍。这说明, 水分补给方式影响着土壤水分的赋存。

入渗是在降雨或灌溉条件下, 水分通过土壤表面垂直或水平进入土壤的过程^[19]。地下水补给是地下水在土层下部沿土壤毛细管进入土壤的过程。这两种方式均是水分补给土壤的过程, 因此土壤含

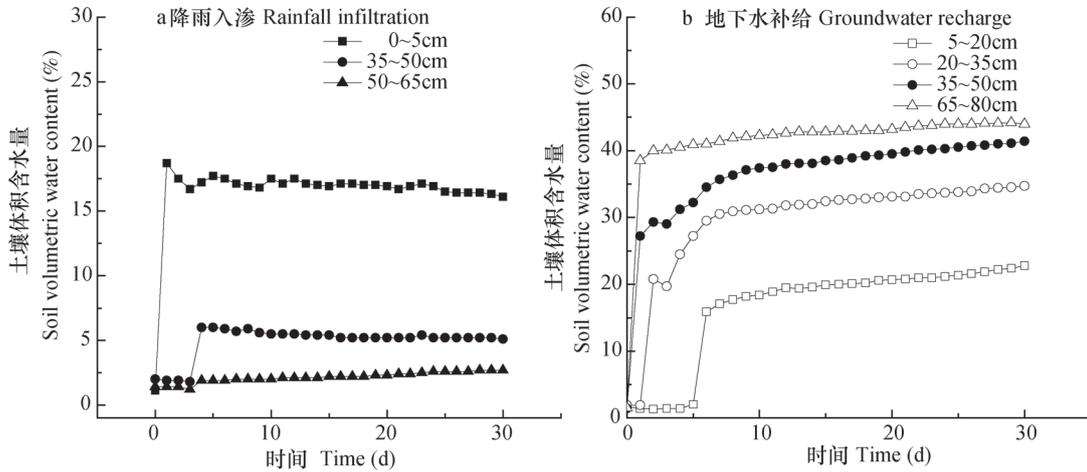


图2 两种方式下土壤体积含水量随时间变化

Fig. 2 Temporal variation of volumetric content of soil water as affected by source of the recharge

水量均会呈现增大趋势。水分补给到土壤中后，受水势梯度作用会继续移动和重新分配，直至土壤剖面不存在水势梯度，因此在入渗结束一定时间或者地下水补给到一定程度时，土壤水分不再增加，趋于稳定，入渗和地下水补给方式水势梯度的差异导致不同深度土壤含水量的差异，且这种差异随着土层深度变化呈现规律性变化：入渗方式下随着土层深度的增加，土壤含水量减小，地下水补给方式则反之。水分的再分配受滞后效应的影响^[19]，入渗和地下水补给方式下，黄绵土土壤水分的变化均呈现滞后效应，不同的是滞后的方向相反。

2.2 土壤水氢同位素变化特征

由于 δD 与 $\delta^{18}O$ 具有相同的变化规律，D的分子量小于 ^{18}O ，故D的分馏效应较 ^{18}O 强，因此应用 δD 的变化来说明土壤水分的运动更有说服力，这也是氢同位素应用领域较氧同位素更为广泛的原因。

2.2.1 土壤水氢同位素随深度的变化特征

图3和图4分别给出了降雨入渗和地下水补给方式下土壤水 δD 随土层深度的变化曲线，表2和表3分别给出了两种试验条件下各土层深度的同位素变化统计特征。

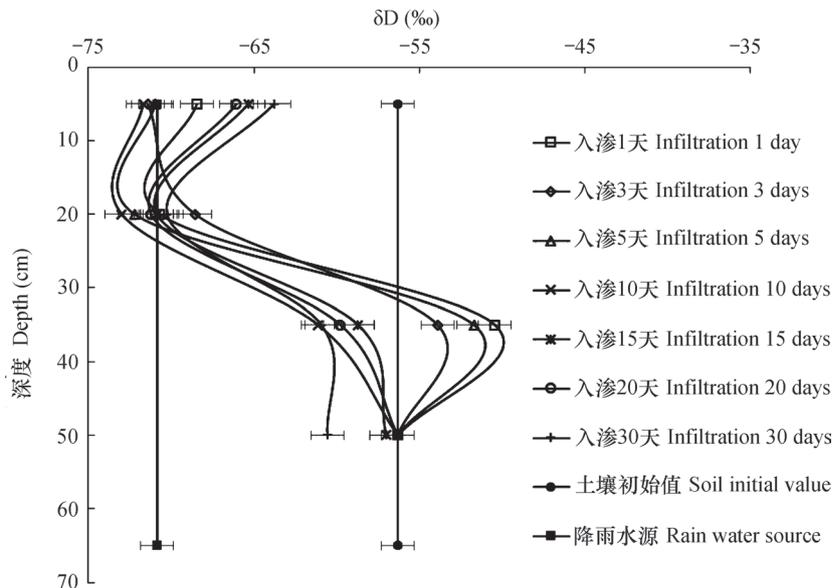


图3 不同降雨入渗时长下 δD 随土层深度的变化趋势

Fig. 3 Temporal variation of δD in the soil water with soil depth under rainfall infiltration

图3整体来看,不同深度土壤水 δD 在降雨同位素值和土壤水初始同位素值之间或者附近变化。不同入渗时长土壤水 δD 随着土层深度的增加均呈现先减小至降雨值附近,再增大至土壤初始值后稳定不变的趋势。

引起土壤水氢同位素的变化原因有大气降水、土壤水混合、蒸发、植被以及人类活动等^[14]。降雨入渗方式下,降雨补给为土壤水的唯一补给来源,降雨补给水与土壤水不断交换混合,因此土壤水氢同位素在降雨与土壤水初始氢同位素值之间变化。随着土层深度的增加土壤水氢同位素受降雨的影响会减弱,因此随着土层深度的增加土壤水氢同位素先减少后增大。其中0~20cm表层土壤水受降雨影响最大,随着土层深度的增加,降雨的影响减弱,35cm以下土壤水氢同位素主要受土壤水初始同位素影响。图3中0~5cm表层土壤水氢同位素与降雨同位素值随着时间的延长而增大,即重同位素

富集,这是因为蒸发使重同位素富集,轻同位素分馏引起的,而5~20cm土层土壤水却能长时期地保留降雨同位素特征,表明降雨在该土层深度内滞留时间长,保水能力较强,这与孙晓旭等^[20]在四川丘陵区坡耕地土壤上研究的结果相似。

表2中,随着土层深度的增加, δD 平均值表现为土层20~35cm>35~50cm>0~5cm>5~20cm。上层土壤水“轻”,下层土壤水“重”;降雨 δD “轻”,土壤水初始 δD “重”。上层土壤水受降雨影响大,因此土壤水“轻”;下层降雨影响减弱,因此土壤水偏“重”。 δD 变异系数表现为土层20~35cm>0~5cm>35~50cm>5~20cm,20~35cm土壤处在降雨与土壤水界面之间,因此变异最大;0~5cm土壤由于蒸发作用变异较大;35~50cm土壤水受降雨和蒸发作用弱,不易发生改变;5~20cm土壤氢同位素变异系数最小,说明该深度土壤受蒸发作用弱,有较好的保水作用。

表2 降雨入渗方式下不同土层土壤水 δD 的统计特征

Table 2 Statistical characteristics of δD in the soil water with soil depth under rainfall infiltration

土壤层次Soil layer (cm)	最大值 Maximum (‰)	最小值 Minimum (‰)	平均值 Average (‰)	变异系数 Coefficient of variation (%)
0~5	-63.77	-71.69	-68.24	4.38
5~20	-68.55	-72.98	-70.96	1.90
20~35	-50.43	-61.11	-56.65	7.39
35~50	-56.30	-60.56	-57.21	2.45

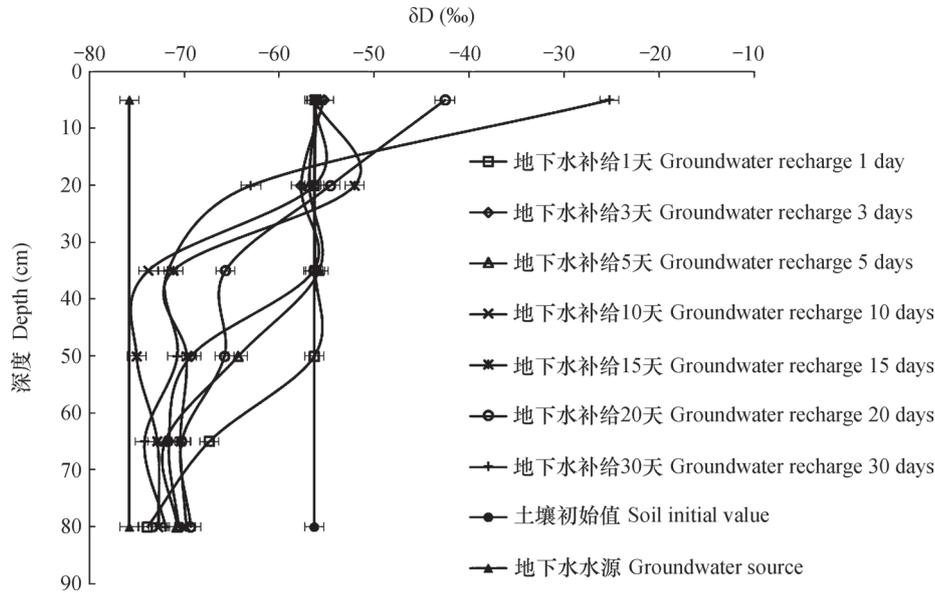
图4表明,地下水补给方式下,各深度土壤水 δD 大部分在地下水与土壤水初始氢同位素值之间变化,个别表层0~5cm土壤水 δD 小于土壤水初始同位素值。随着土层深度的增加,不同补给时长土壤水 δD 逐渐减小至接近地下水氢同位素值稳定不变。

地下水为唯一补给来源时,水分受毛管吸引力作用向上迁移,迁移过程中地下水与土壤水发生混合交互作用,逐渐失去地下水同位素特征,最终转化为土壤水。水分迁移至土壤表层,在蒸发作用下表层土壤水重同位素富集,因此大部分土壤水氢同位素在地下水与土壤水初始氢同位素值之间变化,只有表层0~5cm土壤水在一定时长后受蒸发作用逸出,出现富集。随着水分向土壤表层的迁移,地下水对土壤水的影响逐渐减弱,土壤水同位素值随

着时间延长逐层减小,这表明水分的运动是以活塞式推进向上运移的。

表3中,随着土层深度的增加, δD 平均值与变异系数整体上呈减小趋势。 δD 变异系数表现为:65~80cm<50~65cm<5~20cm<35~50cm<20~35cm<0~5cm,0~5cm变异系数最大,由于蒸发分馏引起重同位素不断富集,使这一层土壤水同位素发生了变化。65~80cm变异系数最小,这一深度土壤水同位素最大限度地保留了地下水的同位素特征,而且受蒸发影响较小,地下水和土壤水也充分发生了混合,因此最不容易发生变化。

室内模拟降雨入渗和地下水补给方式下,土壤水同位素变化受补给水源、水交换以及蒸发影响,降雨或地下水在这些因素的综合作用下逐渐转化为土壤水。这种单一补给方式土壤水同位素特征以及

图4 不同地下水补给时长下 δD 随土层深度的变化趋势Fig. 4 Temporal variation of δD in the soil water with soil depth under groundwater recharge表3 地下水补给方式下不同土层土壤水 δD 的统计特征Table 3 Statistical characteristics of δD in the soil water with soil depth under water recharge by groundwater

土壤层次 Soil layer (cm)	最大值 Maximum (‰)	最小值 Minimum (‰)	平均值 Average (‰)	变异系数 Coefficient of variation (%)
0 ~ 5	-25.24	-56.30	-49.69	22.17
5 ~ 20	-52.06	-62.97	-56.68	5.44
20 ~ 35	-55.81	-73.81	-64.40	11.66
35 ~ 50	-56.30	-25.24	-66.86	8.61
50 ~ 65	-67.35	-74.19	-71.24	2.84
65 ~ 80	-69.30	-73.86	-70.70	2.13

运移特征仅仅在土层深厚、地下水较深、一次降雨入渗深度达不到地下水饱和层时适用，而在土层浅薄、地下水位较浅、一次降雨补给地下水时土壤水同位素和运移特征还有待于进一步研究。

2.2.2 土壤水 δD 与 $\delta^{18}O$ 的关系 Craig等^[21]以全球大气降水氢氧同位素为研究对象，发现了降水中氢氧稳定同位素组成为线性关系： $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$ ，它表示全球降水同位素的一个平均值，对于研究不同水体氢氧稳定同位素的关系具有重要的参考意义。将采集的当地雨水、降雨积水入渗和地下水补给过程中测定的土壤水的 δD 与 $\delta^{18}O$ 值进行拟合，得出二者的相关关系，如图5。

大气降水线的截距和斜率受到气象因素的影

响，截距和斜率的大小反映了蒸发和分馏作用的程度，蒸发强烈的干旱地区，大气降水线的斜率均小于全球大气降水线^[21]。西安降水线的斜率略小于全球大气降水线，而截距大于全球大气降水线。两种补给方式下，土壤水氢氧同位素相关性的斜率和截距均小于全球大气降水线和西安降水线，这是由于土壤水的蒸发分馏效应较降水的分馏效应强。分馏有动力分馏和非动力分馏之分，动力分馏主要是由温度、湿度等因子引起的，非动力分馏主要是由于土壤水与其他水源交互混合引起的分馏^[14, 22-23]，植被蒸腾并不会引起土壤水发生分馏^[10-12]。降雨从高空降落至地面的过程受温度、湿度以及云下二次蒸发的影响而产生分馏，土壤颗粒作为介质，降

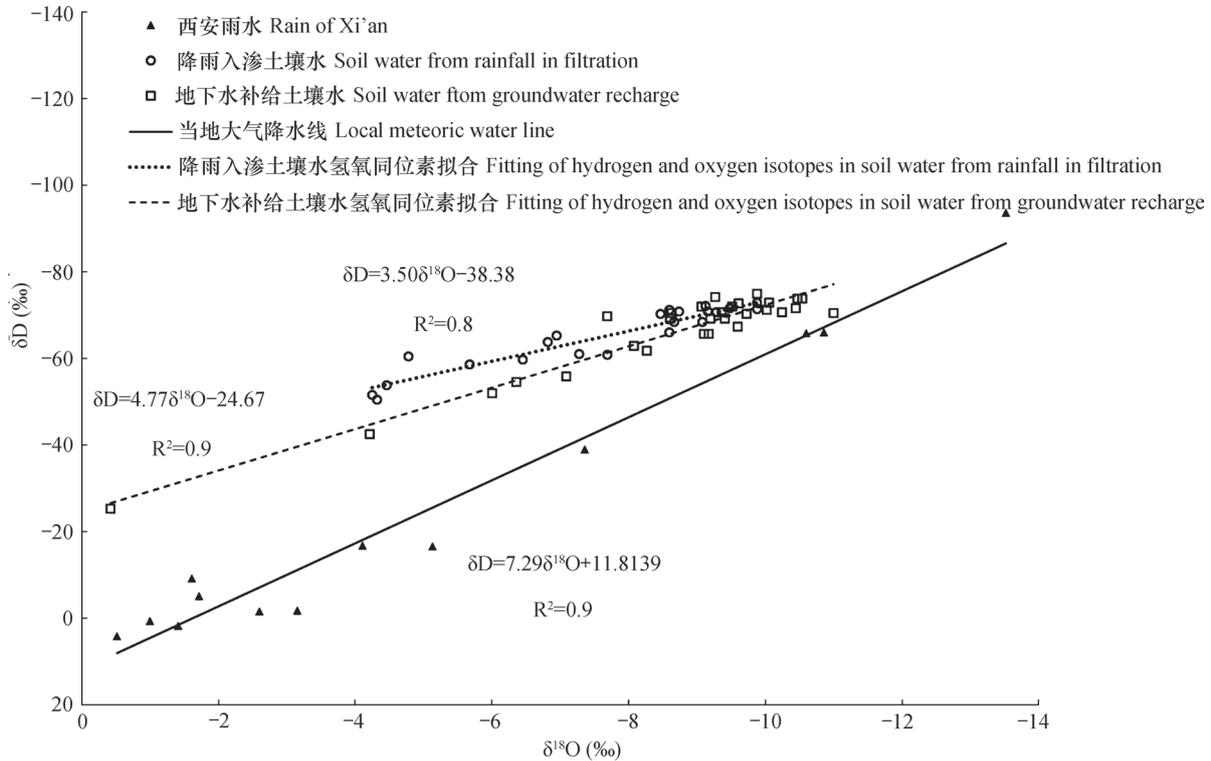


图5 土壤水氢氧同位素的关系

Fig. 5 Relationship between hydrogen and oxygen isotopes in the soil water

低了土壤水蒸发分馏的程度，因此，大气水汽的蒸发程度大于土壤蒸发，至于其原理还有待于进一步研究。地下水补给方式下土壤水氢氧同位素关系线的斜率和截距大于降雨入渗方式，这表明降雨入渗方式的蒸发分馏程度较地下水补给方式强，水分以地下水补给方式进入土壤损失较少、更易保存。

3 结论

土壤含水量的变化能够反映出土壤水分的变化，但土壤水同位素能够反映土壤水分的运移特征。水分的补给方式对土壤含水量整体变化影响不大，但会影响土壤水分滞后的方式和赋存，两种补给方式下水分运移过程中均出现滞后效应，滞后方向相反；在同一深度，降雨入渗土壤含水量小于地下水补给，地下水补给方式更有利于水分的保存。土壤水同位素受补给水源、蒸发、交换混合以及土壤水本身等共同影响，降雨入渗方式下，土壤水上层土壤水受降雨影响大，土壤水“轻”，随深度的增加降雨影响减弱，土壤水偏“重”；地下水补给时，由于地下水较土壤水初始值“轻”，下层土壤水受地下水影响偏“轻”，上层受地下水影响减

弱，且加上蒸发作用，上层土壤水偏“重”。降雨入渗和地下水补给方式下土壤水分是以活塞流形式运动迁移的，降雨入渗水分自上而下以活塞流向深层迁移，地下水补给方式下土壤水分以活塞流方式自下而上缓慢向表层迁移。土壤水氢氧同位素具有良好的线性关系，地下水补给方式下土壤水氢氧同位素线性关系的斜率和截距均大于降雨入渗方式，表明降雨入渗方式土壤水分的蒸发分馏程度较地下水补给方式强，水分以地下水补给方式进入土壤损失较少、更易保存。

参考文献

- [1] Christian L, Piotr M, Christoph K. Tracers in hydrology. No.215. Wallingford: IAHS Publication, 1993: 15—36
- [2] Kendall C, McDonnell J J. Isotope tracers in catchment hydrology. Amsterdam: Elsevier Science, 1999: 443—479
- [3] Leibundgut C. Tracer technologies for hydrological systems. No. 229. Wallingford: IAHS Publication, 1995: 6—23
- [4] Zimmerman U, Ehhalt D, Munnich K O. Soil-water movement and evapotranspiration: Changes in the

- isotopic composition of the water. IAEA Vienna: IAEA Symposium Isotope Hydrology, 1967: 567—584
- [5] Allison G B, Barnes C J, Hughes M W, et al. Effect of climate and vegetation on oxygen-18 and deuterium profiles in soils. *Isotope Hydrology IAEA Symposium*, 1983, 270 (20) : 105—123
- [6] Barnes C J, Allison G B. The distribution of deuterium and ^{18}O in dry soils: 3. Theory for non-isothermal water movement. *Journal of Hydrology*, 1984, 74: 119—135
- [7] Barnes C J, Walker G R. The distribution of deuterium and oxygen-18 during unsteady evaporation from a dry soil. *Journal of Hydrology*, 1989, 112: 55—67
- [8] Chorover J, Mark L B. Kinetics of sorption-desorption// Brantley S L, Kubicki J D, White A F. Kinetics of water-rock interaction. New York, USA: Springer, 2008: 109—149
- [9] Walker G R, Hughes M W, Allison G B, et al. The movement of isotopes of water during evaporation from a bare soil surface. *Journal of Hydrology*, 1988, 97: 181—197
- [10] Mook W G. Environmental isotopes in the hydrological cycle-Principles and applications: Atmospheric Water. No 39. Paris: UNESCO, 2001: 13—42
- [11] Ruppenthal M, Oelmann Y, Wilcke W. Isotope ratios of nonexchangeable hydrogen in soils from different climate zones. *Geoderma*, 2010, 155 (3/4) : 231—241
- [12] Fischer M J. iCHASM, a flexible land-surface model that incorporates stable water isotopes. *Global and Planetary Change*, 2006, 51 (1/2) : 121—130
- [13] 包为民, 王涛, 胡海英, 等. 降雨入渗条件下土壤水同位素变化实验. *中山大学学报: 自然科学版*, 2009, 48 (6) : 132—137. Bao W M, Wang T, Hu H Y, et al. Isotopic variations of soil water in rainfall infiltration experiment (In Chinese). *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2009, 48 (6) : 132—137
- [14] 马雪宁, 张明军, 李亚举, 等. 土壤水稳定同位素研究进展. *土壤*, 2012, 44 (4) : 554—561. Ma X N, Zhang M J, Li Y J, et al. Research advances on stable isotopes in soil water (In Chinese). *Soils*, 2012, 44 (4) : 554—561
- [15] Kwang S L, Jun M K, Dong R L, et al. Analysis of water movement through an unsaturated soil zone in Jeju Island, Korea using stable oxygen and hydrogen isotopes. *Journal of Hydrology*, 2007, 345 (3/4) : 199—211
- [16] 田立德, 姚檀栋, Tsujimura M, 等. 青藏高原中部土壤中稳定同位素变化. *土壤学报*, 2002, 39 (3) : 289—295. Tian L D, Yao T D, Tsujimura M, et al. Stable isotope in soil water in the middle of Tibetan Plateau (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39 (3) : 289—295
- [17] 侯士彬, 宋献方, 于静洁, 等. 太行山区典型植被下降水入渗的稳定同位素特征分析. *资源科学*, 2008, 30 (1) : 86—92. Hou S B, Song X F, Yu J J, et al. Stable isotopes characters in the process of precipitation and infiltration in Taihang mountainous region (In Chinese). *Resources Science*, 2008, 30 (1) : 86—92
- [18] 邓文平, 余新晓, 贾国栋, 等. 北京西山鹫峰地区氢氧稳定同位素特征分析. *水科学进展*, 2013, 24 (5) : 642—650. Deng W P, Yu X X, Jia G D, et al. An analysis of characteristics of hydrogen and oxygen stable isotopes in Jiufeng Mountain areas of Beijing (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2013, 24 (5) : 642—650
- [19] 程立平, 刘文兆. 黄土塬区几种典型土地利用类型的土壤水稳定同位素特征. *应用生态学报*, 2012, 23 (3) : 651—658. Cheng L P, Liu W Z. Characteristics of stable isotopes in soil water under several typical land use patterns on Loess Tableland (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23 (3) : 651—658
- [20] 孙晓旭, 陈建生, 史公勋, 等. 蒸发与降水入渗过程中不同水体氢氧同位素变化规律. *农业工程学报*, 2012, 28 (4) : 100—105. Sun X X, Chen J S, Shi G X, et al. Hydrogen and oxygen isotopic variations of different water bodies in evaporation and rainfall infiltration processes (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2012, 28 (4) : 100—105
- [21] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, 133 (3465) : 1702—1703
- [22] Zhao P, Tang X Y, Wang C, et al. Identifying the water source for subsurface flow with deuterium and oxygen-18 isotopes of soil water collected from tension lysimeters and cores. *Journal of Hydrology*, 2013, 503: 1—10
- [23] 杨杰东, 徐士进. 同位素与全球环境变化. 北京: 地质出版社, 2007: 13—14. Yang J D, Xu S J. Isotope and global environmental change (In Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2007: 13—14

RESEARCH ON SOIL WATER MOVEMENT BASED ON STABLE ISOTOPES

JinYurong Lu Kexin Li Peng[†] Wang Qi Zhang Tiegang Liu Ying

(*State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Northwest Key Laboratory of Water Resource and Environment Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

Abstract Soil moisture, affected jointly by rainfall and groundwater, plays an important role in terrestrial water recycling. Hydrogen and oxygen isotopes can be used as tracers to study water movement and migration in the soil. Stable isotope compositions of soil water can be used to reveal information about a number of hydrological processes in soil, including infiltration, evaporation, transpiration and percolation, which is difficult to obtain by other techniques. The Loess Plateau in northern Shaanxi with loessal soil as its dominant type of soil, is arid in climate and scarce in water resource. A number of studies documenting tracer movement in the soil column except for using loessal soil to study soil water movement under differential recharge based on hydrogen and oxygen isotopes. Researches on soil water movement and migration in loessal soil may help understand characteristics of soil water movement, guide local agricultural production and improve water utilization efficiency in the Loess Plateau.

A simulation experiment using soil columns was carried out in the State Key Laboratory of Northwest Arid Area Experimental Ecology and Hydraulic Engineering, Xi'an University of Technology. With the aid of isotope technology, exploration was done of temporal variation of soil water movement in loessal soil, temporal variation of distribution of isotope in soil water in the soil profile and relationship between oxygen and hydrogen isotopes in the soil water as affected by rainfall or groundwater, in an attempt to elaborate characteristics of soil water movement in loessal soil relative to source of the recharge. During the experiment distributions of soil water content and hydrogen isotope in the soil profile were monitored 1, 3, 5, 10, 15, 20 and 30 days after the end of the recharge and relationship between oxygen and hydrogen isotopes in the soil water was fitted with a linear model.

Results show that (1) being recharged with water from either source, rainfall or groundwater, the soil water increased in volumetric content as the time going on and leveled off in the end and that movement of the soil water obviously lagged behind. (2) Hydrogen isotope in the soil water was affected by source of recharge water, exchanging and mixing of the waters and evaporation of the water in the soil, and with the time going on, the effect of source of the recharge water gradually weakened, while the effects of exchanging and mixing of the waters and evaporation of the water in the soil gradually stood out. Eventually the soil water reached its dynamic balance. (3) When being recharged by rainwater or groundwater, soil water moved in a piston-driven way. With rainfall infiltrating into the soil, δD in the soil water first decreased, and then increased with increasing soil depth and eventually leveled off. The soil water in the surface 0~5cm soil layer was enriched in heavy isotope as a result of evaporation and the soil water in the 5~20cm soil layer stayed for the longest time, indicating that the soil layer is the highest in water retaining capacity. When being recharged by groundwater, the soil water decreased in δD with soil depth. The water in the upper soil layer was enriched in heavy isotope as a result of evaporation, and the water in the deep layer impoverished in isotope by recharge from groundwater. (4) Under either recharge modes, δD and $\delta^{18}O$ in the soil water displayed a nice linear relationship. Isotope fractionation effect of soil water evaporation was greater when soil water was recharged by

rainfall than by groundwater. Soil water recharged by groundwater tended to stay longer in the soil. Obviously, rainfall, groundwater and soil water evaporation all have some impacts on soil moisture. The variation of soil water isotopes with a certain regularity. So adoption of underground irrigation in the Loess Plateau region is conducive to preservation of soil water for agricultural production.

Key words Rainfall infiltration; Groundwater recharge; Soil water movement; Stable isotope

(责任编辑：檀满枝)

CONTENTS

Reviews and Comments

A review of study on microbial ecology of nitrite-dependent anaerobic methane oxidation Shen Lidong (721)

Soil Science and Modern Agriculture

- Spatio-temporal variation of total N content in farmland soil of Jiangxi Province in the past 30 years Zhao Xiaomin, Shao Hua, Shi Qinghua, et al. (730)
- Early warning of heavy metals potential risk governance in Beijing Jiang Hongqun, Wang Binwu, Liu Xiaona, et al. (745)
- Effect of deep application of straw on composition of humic acid in soil aggregates Zhu Shu, Dou Sen, Chen Lizhen (758)
- Effect of biochar application on pakchoi (*Brassica chinensis* L.) utilizing nitrogen in acid soil Yu Yingliang, Xue Lihong, Yang Linzhang, et al. (766)
- Effects of water and fertilizer on fruit yield of high-yielding clonal *Camellia oleifera* Abel Zhang Wenyuan, Guo Xiaomin, Tu Shuping, et al. (774)

Research Articles

- VRML-based virtual reality modeling of three dimensional variation of soil electrical conductivity Li Hongyi, Gu Chengjian, Dan Chenglong, et al. (781)
- Effect of number of sampling sites on characterization of spatial variability of soil organic matter Hai Nan, Zhao Yongcun, Tian Kang, et al. (790)
- Research on soil water movement based on stable isotopes Jin Yurong, Lu Kexin, Li Peng, et al. (800)
- Basic NPK fertilizer recommendation and fertilizer formula for maize production regions in China Wu Liangquan, Wu Liang, Cui Zhenling, et al. (816)
- Effects of fertilization on soil organic carbon and distribution of SOC in aggregates in tidal flat polders Hou Xiaojing, Yang Jingsong, Wang Xiangping, et al. (827)
- Effect of long-term fertilizer application on distribution of aggregates and aggregate-associated organic carbon in paddy soil Mao Xiali, Lu Kouping, He Lizhi, et al. (837)
- Effects of biochar on N₂O and CH₄ emissions from paddy field under rice-wheat rotation during rice and wheat growing seasons relative to timing of amendment Li Lu, Zhou Ziqiang, Pan Xiaoqian, et al. (847)
- Effects of successive application of crop-straw biochar on crop yield and soil properties in cambosols Liu Yuan, M. Jamal Khan, Jin Haiyang, et al. (857)
- Calculation of thickness of shear plane in diffuse double layer of constant charge soil colloid in single electrolyte system Ding Wuqun, Zhu Qihong, Wang Lei, et al. (867)
- Effect of chemical leaching remedying chromium contaminated soil in deserted chemical plant site Li Shiye, Cheng Jiemin (877)
- Limiting factors for restoration of dumping sites of ionic rare earth mine tailings Liu Wenshen, Liu Chang, Wang Zhiwei, et al. (887)
- Residues of organochlorine pesticides in soils of Liaodong and Shandong Peninsulas Zhu Yingyue, Liu Quanyong, Li He, et al. (900)
- Long-term application of winter green manures changed the soil microbial biomass properties in red paddy soil Gao Songjuan, Cao Weidong, Bai Jinshun, et al. (909)
- Effects of intercropping with leguminous crops on tomato yield, soil nutrients and enzyme activity Dai Huihui, Hu Xuefeng, Cao Mingyang, et al. (917)

Research Notes

- Relationship of free amino acids in root exudates with wilt disease (*Fusarium oxysporum*) of faba bean Dong yan, Dong Kun, Tang Li, et al. (924)
- Effects of intercropping of wheat and faba bean on diversity of metabolic function of rhizosphere fungal community Hu Guobin, Dong Kun, Dong Yan, et al. (933)
- Evolvement of structure and abundance of soil nitrogen-fixing bacterial community in *Phyllostachys edulis* plantations with age of time He Donghua, Shen Qiulan, Xu Qiufang, et al. (941)
- Effect of long-term fertilization on carbon sequestration in lime concretion black soil relative to fertilization pattern Li Wei, Kong Lingcong, Zhang Cunling, et al. (949)
- Effects of interplanting grass on utilization, loss and accumulation of ¹⁵N in apple orchard Peng Ling, Wen Zhao, An Xin, et al. (955)

Cover Picture: Full view of ionic rare earth mine desert (by Tang Yetao, Liu Wenshen)

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枳生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 4 期 2015 年 7 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 4 July, 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址: 南京市北京东路 71 号 邮政编码: 210008
电话: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717
电话: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址: 北京 399 信箱 邮政编码: 100044

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929

