

DOI: 10.11766/trxb202104150199

陈露, 张海林, 易军, 刘秀芸, 刘目兴, 李胜龙, 周黎. 水耕历史对稻田-田埂过渡区土壤物理性质与水-氮分布的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60 (2): 409–423.

CHEN Lu, ZHANG Hailin, YI Jun, LIU Xiuyun, LIU Muxing, LI Shenglong, ZHOU Li. Effects of Paddy Rice Cultivation History on Soil Physical Properties and Water/Nitrogen Distribution in the Intermediate Zone between Paddy Field and Bund[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60 (2): 409–423.

水耕历史对稻田-田埂过渡区土壤物理性质与水-氮分布的影响^{*}

陈 露^{1, 2}, 张海林^{1, 2}, 易 军^{1, 2, 3†}, 刘秀芸², 刘目兴^{1, 2}, 李胜龙², 周 黎²

(1. 地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 武汉 430079; 2. 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079; 3. 华中师范大学可持续发展研究中心, 武汉 430079)

摘 要: 选取水耕年限分别为 2 年、19 年和>100 年稻田, 通过野外样品采集与室内分析相结合的方法, 对比了稻田田内和田埂土壤物理性质与水-氮分布差异, 揭示了水耕历史对稻田-田埂过渡区土壤物理性质与水-氮流失过程的影响机制。结果表明, 耕作活动影响了稻田-田埂过渡区土壤容重、孔隙、土壤水分特征曲线和饱和导水率(K_s)等物理性质。随着水耕年限的增加, 田内耕作层与田埂表土层、田内犁底层与田埂硬质层的容重差异增大; 耕作层的中小孔隙(直径<0.03 mm)含量增加, 其他土层的总孔隙和大孔隙(直径>0.3 mm 和>0.03 mm)含量降低; 田内土壤的 K_s 下降速度较田埂更快。在测定的吸力范围内(0~100 kPa), 2 年和 19 年的耕作层与表土层持水能力相近, 而 100 年耕作层持水能力高于表土层; 2 年和 100 年的硬质层与犁底层持水能力相近, 而 19 年硬质层持水能力更强; 19 年和 100 年田埂底土层持水能力较田内强。随着水耕年限增加, 耕作层与表土层 K_s 差异减小, 硬质层与犁底层 K_s 差异增加, 2 年、19 年和 100 年硬质层的 K_s 分别是对应犁底层的 1.10 倍、6.90 倍和 6.32 倍, 100 年田埂底土层的 K_s 明显高于田内。土壤物理性质的变化影响稻田-田埂过渡区的水-氮分布特征, 主要表现为 2 年稻田的水-氮含量明显低于 19 年和 100 年稻田, 且 19 年和 100 年稻田的水-氮在耕作层聚集。当水耕年限较短时, 水-氮同时通过田内和田埂区域快速流失; 随着水耕年限的增加, 水-氮更易通过田埂发生渗漏。老稻田新修田埂的硬质层土壤会发生退化, 再次成为水-氮快速流失位点。因此, 对于耕作年限长的稻田, 其田埂区域的水-氮渗漏更应引起重视。

关键词: 稻田田埂; 容重; 饱和导水率; 水分特征曲线; 含水量; 含氮量

中图分类号: S152.7; S157.1 **文献标志码:** A

^{*} 国家自然科学基金项目(41601215, 41771261)、中央高校基本科研业务费(CCNU20QN030)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41601215, 41771261) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. CCNU20QN030)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: yijun@ccnu.edu.cn

作者简介: 陈 露(1996—), 女, 河北张家口人, 硕士研究生, 主要从事稻田土壤水文研究。E-mail: clccnu2019@163.com

收稿日期: 2021-04-15; 收到修改稿日期: 2022-01-13; 网络首发日期(www.cnki.net): 2022-04-01

Effects of Paddy Rice Cultivation History on Soil Physical Properties and Water/Nitrogen Distribution in the Intermediate Zone between Paddy Field and Bund

CHEN Lu^{1,2}, ZHANG Hailin^{1,2}, YI Jun^{1,2,3†}, LIU Xiuyun², LIU Muxing^{1,2}, LI Shenglong², ZHOU Li²

(1. Hubei Province Key Laboratory for Geographical Process Analysis & Simulation, Wuhan 430079, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, China; 3. Research Institute of Sustainable Development, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract: 【Objective】 Lateral seepage around the paddy bund is an important pathway for water loss in the paddy rice field. Revealing the evolution process of soil physical properties and the characteristics of soil water and nitrogen distribution in the intermediate zone between paddy field and bund is important. This is crucial for understanding the mechanism of water and nitrogen loss in the intermediate zone. 【Method】 The intermediate zone between paddy field and bund with a cultivation history of 2 years, 19 years, and >100 years was considered for this study. Soil properties, including soil bulk density, equivalent porosity, soil-water characteristic curve, saturated hydraulic conductivity (K_s), soil water content and soil nitrogen concentration were determined through field sampling and laboratory analysis. The evolution process of soil physical properties and the mechanism of water and nitrogen loss in the intermediate zone were evaluated. 【Result】 The paddy rice cultivation history affected soil physical properties. With the cultivation history extending, the difference in soil bulk density between paddy field plow layer (PL) and paddy bund surface layer (SL), and between paddy field plow pan (PP) and paddy bund hard pan (HP) increased. The microporosity (with diameter <0.03 mm) in PL and SL increased with paddy rice cultivation history, while the macroporosity (with diameter >0.3 mm and >0.03 mm) decreased in other soil layers for both in paddy field and bund. This showed a quicker decrease rate in the paddy field than for the bund. Differences in soil water holding capacity (SWHC) between paddy fields and bund were identified in the measured water suction range (0~100 kPa). Similar SWHC was observed between PL and SL in both 2 years and 19 years paddy rice fields, while a much higher SWHC was found in PL than SL in >100 years paddy rice fields. Also, a similar SWHC between PP and HP were identified in both 2 years and 100 years paddy rice fields, while a much higher SWHC was found in PP than HP in the 19 years paddy rice field. A higher SWHC was observed in the paddy bund subsoil layer (BSL) than the paddy field subsoil layer (FSL) for both 19 years and >100 years paddy rice fields. With paddy rice cultivation history extending, the differences in K_s between PL and SL decreased, while it increased between PP and HP. For example, the K_s in PP was 1.10, 6.90, and 6.32 times that in HP for 2 years, 19 years, and >100 years paddy rice fields, respectively. Also, a much higher K_s was observed in bund than the field for >100 years paddy rice field, while no significant differences were observed for the other two fields. The soil water and nitrogen distribution patterns were affected by the evolution of soil physical properties in both paddy fields and bund. Also, a higher soil water content and soil nitrogen concentration were observed in 19 years and >100 years paddy rice fields than in 2 years paddy rice fields, which was mainly accumulated in the PL for both 19 years and >100 years paddy rice fields. 【Conclusion】 For the young paddy rice field, soil water and nitrogen rapidly seepage from both paddy fields and bund identically. With the paddy rice cultivation history extending, soil water and nitrogen are expected to be lost more quickly from the paddy bund than the field. For >100 years paddy rice fields, the PP in the newly built bund will degrade with time, then the paddy bund will be the key site for soil water and nitrogen lose again. Therefore, the soil water and nitrogen loss from the paddy bund should be given more attention, and the focus should be more on old paddy than young paddy rice fields.

Key words: Paddy bund; Bulk density; Saturated hydraulic conductivity; Soil-water characteristic curve; Water content; Nitrogen concentration

水稻是全球广泛种植的粮食作物,也是全球耗水量最大的灌溉作物,水分利用效率不高是制约水稻可持续生产的重要原因^[1]。稻田的水分通过蒸发、

蒸腾、地表径流、田内垂直渗漏和田埂侧向渗漏等方式损失^[2]。水分的渗漏不仅降低了水分利用效率,还会驱动可溶性的农药、化肥流失^[3],造成水体污

染^[4-5]。尽管田埂只占稻田面积很小的一部分,但田埂区域的水分渗漏流失量可高达水分总损失量的30%~50%^[6-8]。因此,稻田田埂区域的水分渗漏问题需要引起重视。

田埂位于稻田四周,一般具有农事劳作行走、田块区分、灌溉、排水等功能;可分为修筑于灌排沟与稻田间的田沟田埂和修筑于两块稻田之间的田间田埂^[2]。由于稻田与灌排沟渠存在水头差,造成田内水分通过田沟田埂发生侧向渗漏。此外,一些研究发现稻田田内与田埂耕作条件的差异导致两者的土壤性质发生分异,进而影响稻田的水分流失过程^[2]。耕作条件的差异主要体现在两个方面,一是稻田土壤在耕作和收获时受到耕牛和耕作器具压实,而田埂土壤只受到行人的踩踏,因此田内土壤会在更快时间内变得紧实^[9-10],特别是耕层以下土壤;二是田埂不会长期淹水,因此土壤动物活动更为频繁,且田埂的杂草根系较水稻根系发达,导致田埂区域的生物孔隙更多^[2, 8, 11]。因此,与稻田田内土壤相比,田埂下方的土壤往往表现为更低的容重、更多的大孔隙,进而导致大量水分从田埂下方流失^[2, 9],加剧了稻田水肥渗漏的风险。

稻田土壤物理性质演变是一个长期的过程^[12-13]。随着水耕年限的增加,稻田耕层以下土壤持续受到强烈的压实,犁底层厚度、容重不断增大,饱和导水率(K_s)持续降低^[14]。田埂受压实作用较小,因此其容重增加速度与 K_s 的降低速度会小于田内,而田埂区域土壤动物和杂草根系的影响会降低土壤的容重、增加土壤的大孔隙和 K_s ^[2, 11],这两种效应的相互抵消会对田埂土壤物理性质造成何种影响尚未明确。由于稻田田内与田埂土壤物理性质存在非同步演变,这可能导致其差异随着水耕年限的增加而逐渐增大,进而也会改变稻田水分渗漏速率与不同水分损失途径的分配比例。尽管田埂作为稻田水分快速流失的区域已被一些研究人员证实^[2, 6, 10],但关于水耕年限对稻田-田埂过渡区土壤性质影响的研究鲜有报道。此外,农业生产过程中也会存在大面积的农田田块重新划分的现象,譬如20世纪80年代推行的家庭联产承包责任制、近年来开展的土地整治工程等。田块的重新划分致使稻田田埂位置发生了改变^[10],新的田埂往往修建于已有犁底层的稻田表层。新田埂下方的犁底层可以有效阻挡稻田水肥的快速渗漏,但随着水耕年限的增加,田埂下方的犁底层是否会由于缺少持续压实以及生物活

动的作用而发生退化,从而又成为稻田水肥流失的快速路径尚不明确。基于此,需要围绕不同水耕历史的稻田-田埂过渡区继续开展土壤物理性质方面的相关研究,这对于完善稻田系统土壤性质的演变规律认知,进一步揭示稻田水肥流失机制有着重要作用。

江汉平原是我国重要的稻作区,由于水稻种植的机械化水平提高、农业劳动力减少,以及水稻效益较旱地高,近些年来旱地改稻田现象普遍存在^[15-16]。由于稻田需要更多的灌溉水与氮肥投入,因此这种改变进一步加剧了水资源短缺与水体氮素污染风险。本文拟以不同水耕历史稻田样地为研究对象,通过研究稻田田内与田埂土壤的物理性质与水-氮分布特征差异,揭示耕作历史对稻田水-氮渗漏途径与过程的影响,以期为制定合理的稻田水肥管理方案与耕作措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于华中师范大学江汉平原农田生态系统试验站。江汉平原(29°26'—31°37'N, 111°14'—114°36'E)位于中国湖北省中南部,总面积 $4.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该地区属亚热带季风区,年平均气温15~17℃,无霜期240~260 d。多年平均降水量为1 100~1 300 mm,其中年降水量的70%集中在4—9月^[17]。江汉平原农田类型主要包括水耕稻田、旱地和水旱轮作农田^[15]。江汉平原水稻种植历史悠久,是我国重要的商品粮基地。受稻田经济效益较高、灌溉条件改善等因素驱使,该地区近20多年广泛存在旱地改稻田的现象^[16]。

1.2 样品采集

在经多次现场调查后,分别选定2015年春季“旱改水”、1998年春季“旱改水”和连续水耕>100年的典型稻田区(单季中稻)样地开展试验。为尽量减小土壤母质和农田管理方式等因素对实验结果的影响,选择的3块稻田样地均分布在同一灌排单元内(45 hm^2),相距<500 m,且均属于同一农户。由于土壤样品采集工作于2016水稻收获后开展(10月3—6日),故将各农田分别称为水耕2年、19年和>100年稻田,其中2年和19年稻田在“旱改水”前已连续旱作超过80年(旱作期间主要种植苧麻、棉花和黄豆),而100年稻田的连续水耕历史已超过

100 年。3 块样地最后一次追施氮肥为 8 月 5 日,且从 9 月初开始自然排干、不再灌溉。本研究关注的田埂是两块稻田(水耕年限相同)之间的田间田埂,2 年和 19 年田埂为“旱改水”时取田内耕层土壤堆砌压实而成;>100 年田埂为 20 世纪 80 年代初推行家庭联产承包责任制重新分田时修建,其修建于原稻田表面,其下部有成熟的犁底层。各田埂修建后,其位置不再变化,只有在农田耕作时会对田埂表层被破坏的部分进行修缮。

为了对比稻田田内与田埂区域土壤基本理化性质和水力性质的差异,于 2016 年 10 月 3—5 日在田埂下方和紧邻田埂的田内区域开挖土壤剖面后进行采样(图 1a)。在采样前,于各田块的田内-田埂过渡区分别开挖了 3 个 80~100 cm 深的土壤剖面(至潜水位),在完成土壤分层调查后,用体积为 100 cm³ 的环刀分别分层采集田内、田埂不同深度原状土样,用于 K_s 和水分特征曲线的测定。由于各土层深度均大于环刀高度(5 cm),采样以 7~10 cm 垂直间隔进行。此外,于同深度土层采集扰动土样测定有机质含量和土壤颗粒组成等基本理化性质。由于 3 个

稻田样地剖面深度有差异,为保证各样地土壤性质的可对比性,统一比较 0~80 cm 深度范围各土壤性质的差异;为确保田内与田埂土壤性质的可对比性,不统计田埂高于田内地表部分的土壤性质;共计环刀样品 204 个,扰动土样 95 个。

为探究田内和田埂区域的水-氮分布特征,10 月 6 日使用土钻分别在 3 种年限稻田的田内和田埂区域分层采集 0~100 cm 深度的扰动土样(图 1b),用于测定土壤含水量、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量。采样时,以田埂与田内交界处为原点(0 cm),分别在原点两侧的 200、100、50、30、10、-10、-30、-50、-70 cm 位置,以 10 cm 深度为间隔采集扰动土;考虑到距离田埂越远,氮素浓度变化可能越小,因此田内远处样点间隔更大。由于 100 年稻田的田埂较 2 年和 19 年窄,因此 100 年稻田田埂上的采样点分布更为密集,选取了 200、100、50、30、10、0、-10、-20、-30、-40 cm 等 10 个样点。每个年限样地取 3 次重复,并将所采集的土样及时冷冻保存,带回实验室后进行分析;3 个样地共采集土样 981 个,所有土样均纳入本文的数据分析。

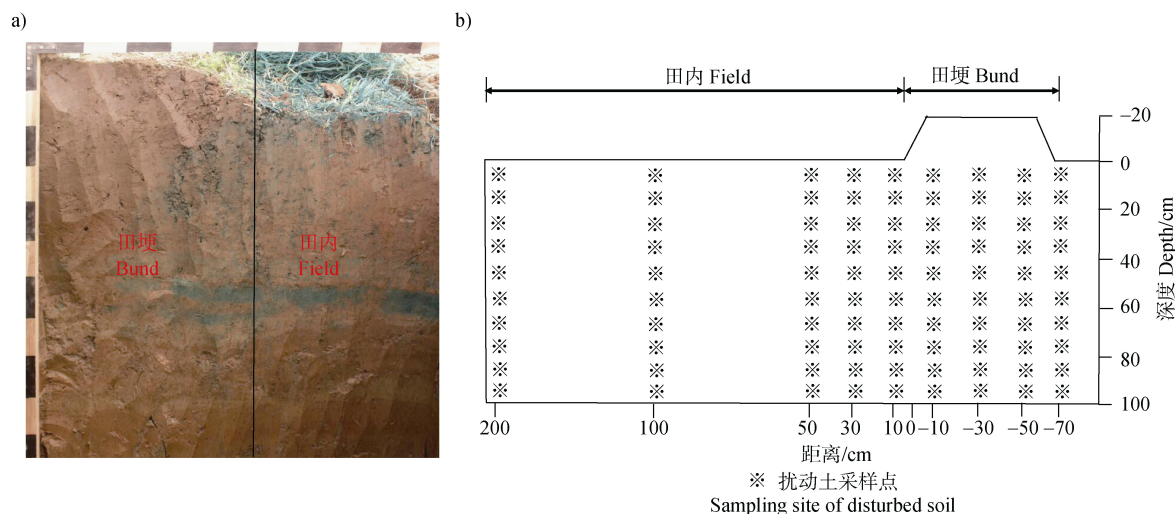


图 1 田内-田埂过渡区土壤采样点分布

Fig. 1 The distribution of soil sampling sites in the intermediate zone between paddy field and bund

1.3 土壤基本理化性质与水力学性质测定

图 1a 所示区域采集的扰动土样在风干过筛后进行土壤有机质含量(重铬酸钾外加热法)和颗粒组成(MS3000 激光粒度分析仪)测定;原状土样用于测定容重(环刀法)、 K_s (定水头法)和土壤水分特征曲线(离心机法)^[18]。图 1b 所示区域采集的土壤样品在解冻后测定土壤含水量、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量(靛酚蓝比色法)^[19]和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量(紫外分光光度法)^[20]。

为了对比土壤孔隙,特别是土壤大孔隙分布差异,本文参考孙梅等^[21]总结的土壤大孔隙分类标准,分别计算了直径>0.3 mm 和>0.03 mm 的大孔隙含量,此部分孔隙是导致水肥快速流失的通道;而直径<0.03 mm 的中小孔隙有利于水肥的稳定保存。孔隙的计算依据测定的水分特征曲线,借助茹林公式($D=3/h$, D 为当量孔径, mm, h 为吸力值, cm)^[2]完成。

表 1 不同水耕历史稻田田内和田埂土壤理化性质

Table 1 Soil physiochemical properties in paddy field and bund with different cultivation history

位点 Location	深度 Depth	发生层 Genetic horizon	有机质含量 Organic matter content / (g·kg ⁻¹)	机械组成 Soil particle composition/%		
				黏粒 Clay (<0.002 mm)	粉粒 Silt (0.002~0.02 mm)	砂粒 Sand (>0.02 mm)
2 年田内 2 Year field	0~11	PL	23.79±1.09	25.94±0.15	42.02±0.13	32.04±0.27
	11~24	PP	21.03±3.11	32.87±0.22	40.02±0.16	27.11±0.38
	>24	FSL	7.82±0.89	21.29±7.17	33.87±8.66	44.84±14.80
2 年田埂 2 Year bund	0~9	SL	18.03±3.54	24.64±0.61	36.34±0.58	39.03±1.18
	9~18	HP	23.72±0.19	29.75±0.16	38.85±0.11	31.40±0.27
	>18	BSL	6.41±1.84	25.35±5.98	39.73±3.90	34.92±8.95
19 年田内 19 Year field	0~15	PL	28.76±1.08	29.05±2.68	35.02±1.48	35.93±3.89
	15~30	PP	8.12±0.67	32.79±4.07	39.07±3.13	28.14±7.03
	>30	FSL	8.99±1.08	35.32±6.29	40.97±2.61	23.70±6.16
19 年田埂 19 Year bund	0~17	SL	19.67±0.74	24.69±0.36	42.88±0.33	32.42±0.69
	17~30	HP	14.18±0.78	32.29±0.28	43.42±0.22	24.29±0.50
	>30	BSL	9.34±2.90	39.23±3.56	39.00±2.45	21.77±5.94
100 年田内 100 Year field	0~18	PL	33.30±0.92	30.42±1.99	33.18±1.12	36.40±2.74
	18~38	PP	11.61±0.83	39.93±7.26	36.96±3.37	23.11±8.91
	>38	FSL	8.99±0.61	44.11±7.25	39.81±4.28	16.08±5.14
100 年田埂 100 Year bund	0~18	SL	23.45±0.77	20.44±0.27	35.33±0.33	44.23±0.60
	18~36	HP	17.85±1.13	28.34±0.19	37.26±0.27	34.40±0.46
	>36	BSL	16.70±0.53	36.39±0.23	38.64±0.20	24.97±0.43

注：PL 代表耕作层；PP 代表犁底层；FSL 代表田内底土层；SL 代表表土层；HP 代表硬质层；BSL 代表田内底土层。Note: PL represent plow layer; PP represent plow pan; FSL represent subsoil layer in paddy field; SL represent surface layer; HP represent hard pan; BSL represent subsoil layer under bund.

1.4 数据分析与作图

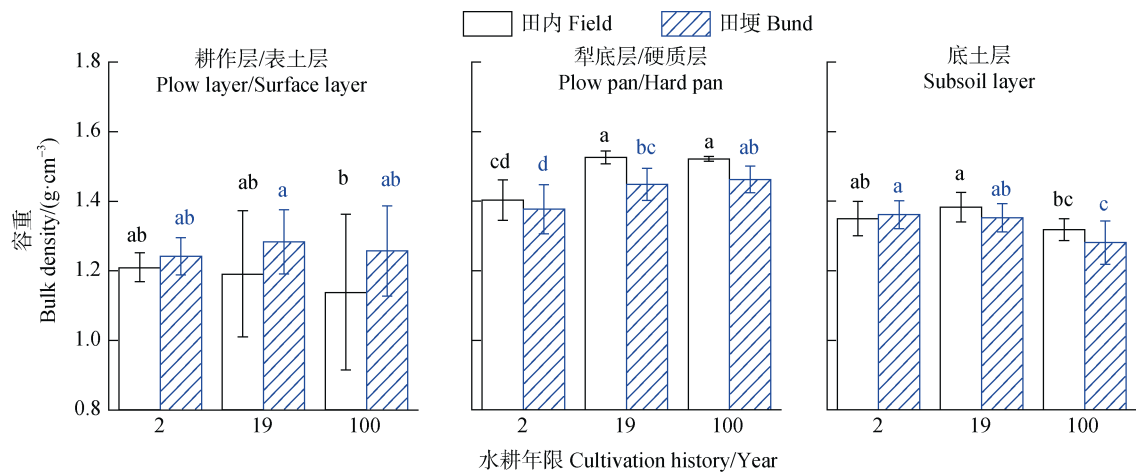
本文使用 Excel 2019 进行数据处理；使用 SPSS 22.0 进行正态分布检验、单因素方差分析和 Pearson 相关性分析，方差分析用于比较不同样地各深度土壤性质的差异，线性相关分析用于揭示各土壤性质与 K_s 的定量数值关系；使用 Origin 9.0 制作点线图和柱状图；使用 Surfer 12 绘制水-氮分布的二维插值图（克里金插值法）。

2 结 果

2.1 不同水耕年限稻田土壤容重差异

耕作活动影响了稻田-田埂过渡区的土壤容重（图 2）。三种稻田的土壤容重均表现为犁底层/硬质层最高，底土层其次，耕作层/表土层最低。随着水

耕年限的增加，田内耕作层土壤容重减小，犁底层容重增加，而底土层变化较小；田埂表土层容重变化较小，硬质层容重增加，底土层容重略有降低。方差分析结果显示，19 年田埂的表土层容重显著高于 100 年表土层，其他位点之间无显著差异；19 年（1.53 和 1.45 g·cm⁻³）和 100 年（1.52 和 1.46 g·cm⁻³）犁底层和硬质层容重显著高于 2 年（1.40 和 1.38 g·cm⁻³）；19 年田内底土层容重高 100 年，而 2 年（1.35 g·cm⁻³）和 19 年（1.35 g·cm⁻³）田埂底土层容重高于 100 年（1.28 g·cm⁻³）。耕作历史影响了田内与田埂容重的差异。3 种稻田耕作层和表土层容重差异不显著，但 2 年的差异更小；19 年犁底层容重显著大于硬质层，而 2 年和 100 年样地容重无显著差异，但 2 年的差异更小（0.02 g·cm⁻³）；3 种稻田田内和田埂的底土层容重差异不明显。



注：不同字母表示同一发生层的容重存在显著性差异（ $P<0.05$ ）。Note: Different alphabets demonstrate the significant difference in soil bulk density ($P<0.05$).

图 2 不同水耕历史稻田田内与田埂容重
Fig. 2 Soil bulk density in paddy field and bund with different cultivation history

2.2 不同水耕年限稻田土壤当量孔径差异

水耕历史影响了土壤的孔隙分布（表 2）。耕作层/表土层和底土层<0.03 mm 孔隙占比高，犁底层/硬质层>0.03 mm 和>0.3 mm 孔隙占比低。水耕年限越长，耕作层<0.03 mm 的孔隙占比增加，而>0.03 mm 和>0.3 mm 的孔隙占比降低，表土层各孔径孔隙占比均降低；除硬质层<0.03 mm 孔隙占比增加外，犁底层和硬质层各孔径孔隙占比降低；田内和田埂底土层<0.03 mm 孔隙占比增加，而>0.03 mm 和>0.3 mm 孔隙占比降低。

随水耕年限增加，田内和田埂各孔径孔隙占比

的差异也发生了变化。耕作层与表土层>0.3 mm 孔隙占比差异随水耕年限增加而减小，而>0.03 mm 孔隙占比差异增加；除 2 年犁底层/硬质层<0.03 mm 孔隙外，硬质层各孔径孔隙均大于犁底层；随水耕年限的增加，田埂底土层各孔径孔隙含量高于田内。方差分析结果显示，100 年耕作层（55.99%）<0.03 mm 孔隙占比显著高于表土层（40.54%）；2 年犁底层各孔径孔隙占比最高，随着水耕年限的增加，犁底层>0.03 mm 和>0.3 mm 孔隙占比小于硬质层；100 年（50.09%）田埂底土层<0.03 mm 孔隙占比明显高于田内（43.32%）。

表 2 不同水耕历史稻田田内和田埂土壤当量孔径分布

Table 2 Soil equivalent porosity distribution in paddy field and bund with different cultivation history				
发生层	水耕年限	当量孔径占比 Equivalent porosity/%		
Genetic horizon	Cultivation history	<0.03 mm	>0.03 mm	>0.3 mm
PL	2	39.52±0.99c	9.92±1.70a	5.95±1.24a
	19	47.71±1.91b	10.42±1.59a	4.40±1.87ab
	>100	55.99±4.21a	9.29±2.19ab	2.97±0.64ab
SL	2	49.68±16.37ab	9.11±1.15abc	4.43±0.58ab
	19	43.92±1.90bc	7.22±0.41bc	2.76±0.76b
	>100	40.54±4.62c	6.42±3.09c	3.02±2.91b
PP	2	40.62±1.13ab	6.24±2.41ab	2.64±1.95a
	19	36.96±2.85c	4.73±0.79bc	1.33±0.29b
	>100	41.73±0.97a	3.33±0.37c	0.96±0.27b

续表

发生层 Genetic horizon	水耕年限 Cultivation history	当量孔径占比 Equivalent porosity/%		
		<0.03 mm	>0.03 mm	>0.3 mm
HP	2	37.96±0.81bc	7.83±2.34a	3.50±1.71a
	19	42.14±1.04a	5.10±0.24bc	2.09±0.23ab
	>100	41.90±2.16a	5.96±2.86ab	2.25±0.97ab
FSL	2	37.30±8.17c	11.86±6.87a	2.55±1.07ab
	19	39.60±2.68cd	8.18±2.62b	2.74±1.23a
	>100	43.32±6.26bc	5.31±2.93b	0.70±0.24ab
BSL	2	41.91±3.71bc	7.39±4.75b	2.46±1.30ab
	19	45.84±6.20ab	6.65±2.82b	2.01±0.68ab
	>100	50.09±1.70a	4.59±0.59b	0.99±0.20b

注：PL 代表耕作层；PP 代表犁底层；FSL 代表田内底土层；SL 代表表土层；HP 代表硬质层；BSL 代表田内底土层；不同字母表示田内和田埂的当量孔径占比在同一发生层存在显著性差异（ $P<0.05$ ）。Note: PL represent plow layer; PP represent plow pan; FSL represent subsoil layer in paddy field; SL represent surface layer; HP represent hard pan; BSL represent subsoil layer under bund; different alphabets demonstrate the significant difference in soil equivalent porosity between paddy field and bund in same soil horizon（ $P<0.05$ ）。

2.3 不同水耕年限稻田土壤持水能力差异

耕作活动也影响了土壤的持水能力（图 3）。一般认为在相同的吸力值下土壤含水量越高，则表示持水能力越强。在本研究测定吸力值范围内（0~100 kPa），对于同一水耕年限稻田田内/田埂位点的不同土层，表现为 2 年稻田各土层之间的差异相对较小，19 年和 100 年稻田犁底层/硬质层的持水能力明显弱于其他土层，100 年耕作层持水能力高于其他土层。相同吸力值下，随水耕年限的增加，耕作层持水能力增强，犁底层持水能力减弱，田埂各土层持水能力变化不大。在 0~100 kPa 范围内，100 年耕作层平均含水量是 19 年和 2 年的 1.29 倍和 1.45 倍。

田内/田埂同一深度土层的持水能力存在差异，且这种差异受水耕年限影响（图 3）。2 年耕作层与表土层的持水能力较为接近，19 年耕作层略高，而 100 年田内耕作层的持水能力远高于田埂表土层。对于犁底层/硬质层土壤，2 年田内与田埂土壤的持水能力接近；19 年硬质层的持水能力在整个吸力段均高于犁底层；而 100 年硬质层的持水能力在低吸力段（0~30 kPa）高于犁底层，随吸力的增加差异减小。2 年田埂底土层的持水能力与田内相近，19 年和 100 年田内底土层的持水能力在整个吸力段均小于田埂。

2.4 不同水耕年限稻田土壤导水性能差异

耕作活动影响稻田土壤的 K_s （图 4）。在垂直方向上，田内土壤的 K_s 表现为耕作层和底土层高于犁底层；对于田埂土壤，除 100 年田埂底土层 K_s 明显较低外，其他层次差异不大。方差分析结果表明，所有样点耕作层/表土层的 K_s 无显著差异；对于犁底层/硬质层，2 年田内和田埂的 K_s 显著高于 19 年和 100 年田内，而其他样点间无显著差异；对于底土层，100 年田内和田埂的 K_s 显著低于其他样点。随着水耕年限的增加，耕作层/表土层 K_s 逐渐减小，田内犁底层和田埂硬质层 K_s 均呈下降趋势。田内/田埂相同深度土壤发生层 K_s 的差异受水耕年限的影响。2 年田内耕作层的平均 K_s 为田埂表土层的 4.52 倍，而 19 年和 100 年稻田二者差异逐渐减小。2 年犁底层和硬质层 K_s 相近，随着水耕年限的增加，田埂硬质层的 K_s 明显高于田内犁底层，19 年和 100 年硬质层的 K_s 分别为犁底层的 6.90 倍和 6.32 倍。对于底土层，2 年和 19 年田内和田埂底土层的 K_s 差异较小，100 年田埂底土层平均 K_s 为田内的 5.81 倍，而中位数表现为田内更高。

2.5 稻田-田埂过渡区土壤含水量分布特征

水耕历史影响稻田-田埂过渡区的土壤含水量（图 5）。19 年和 100 年稻田表层土壤（0~20 cm）含水量最高，犁底层最低，而 2 年稻田各土层含水

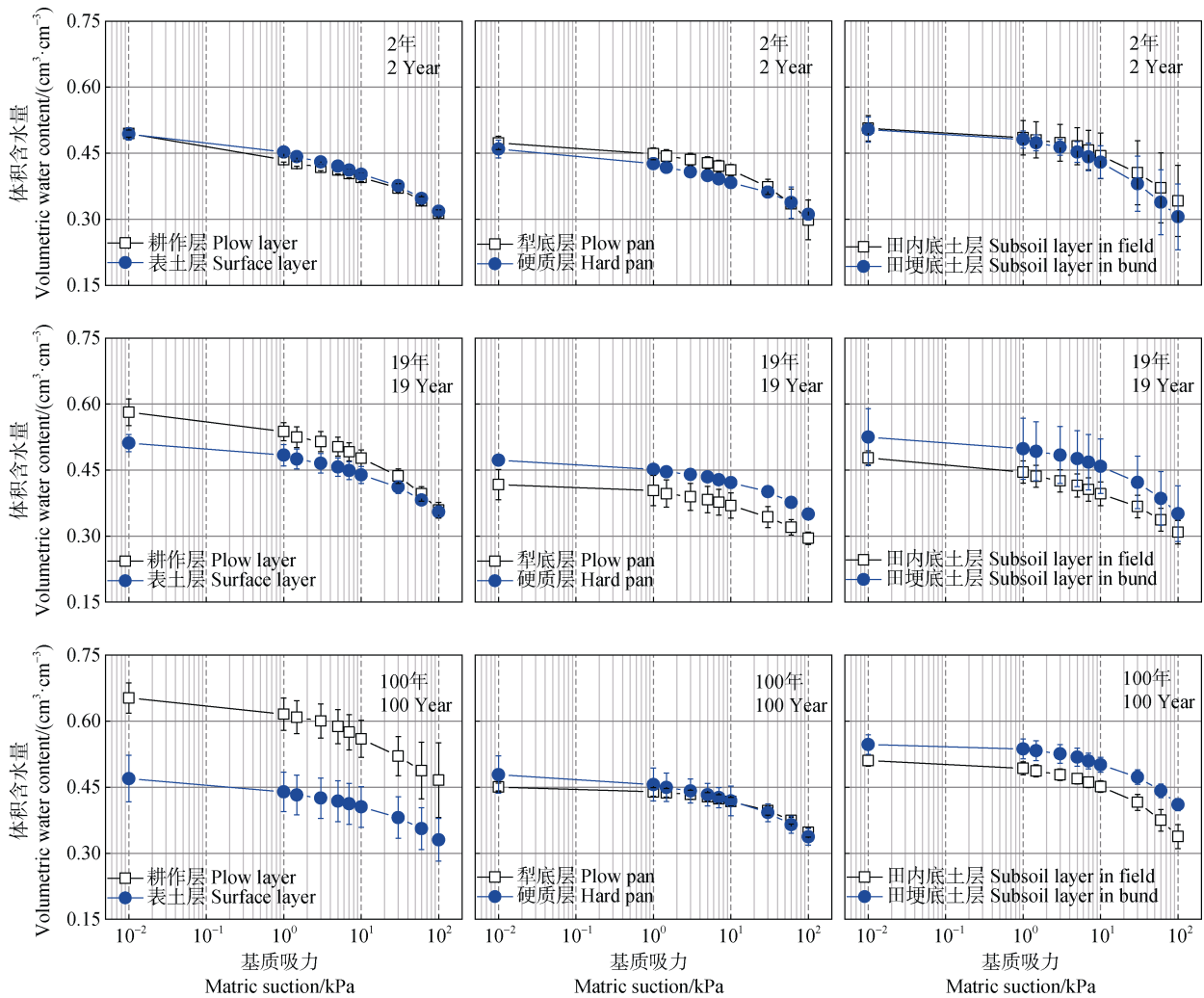
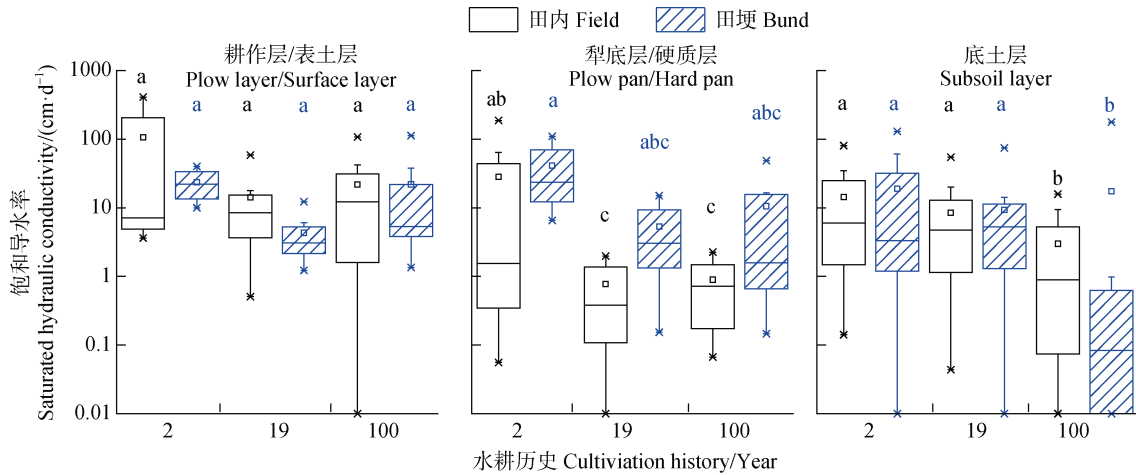


图3 不同水耕历史稻田田内和田埂土壤水分特征曲线

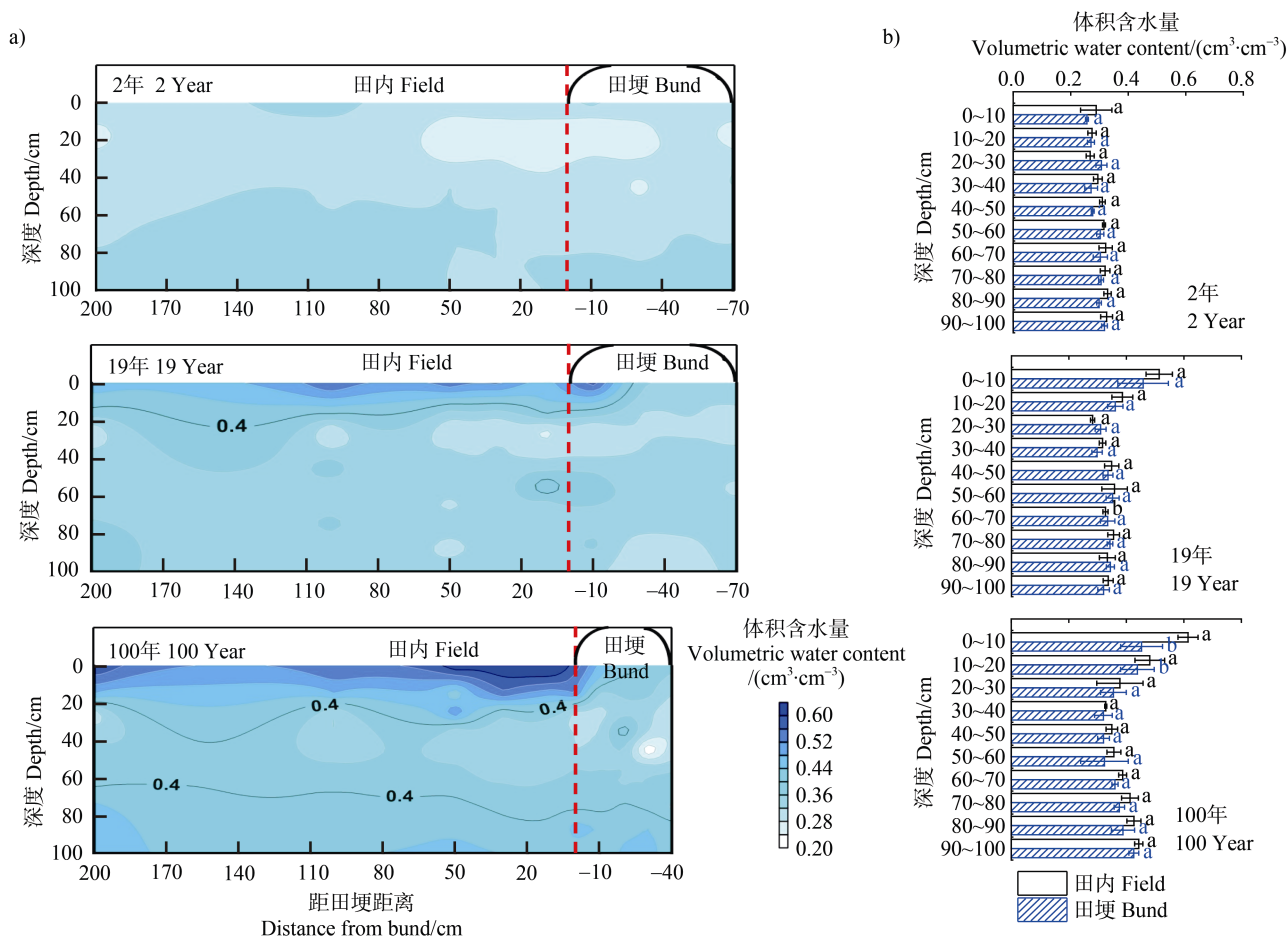
Fig. 3 Soil-water characteristic curves in paddy field and bund with different cultivation history



注：不同字母表示同一发生层的土壤饱和导水率存在显著性差异 ($P < 0.05$)。Note: Different alphabets demonstrate the significant difference in saturated hydraulic conductivity of the same soil horizon ($P < 0.05$) .

图4 不同水耕历史稻田田内和田埂土壤饱和导水率

Fig. 4 Soil saturated hydraulic conductivity in paddy field and bund with different cultivation history



注：不同字母表示同一深度的土壤体积含水量存在显著性差异 ($P < 0.05$)。Note: Different alphabets demonstrate the significant difference in volumetric soil water content of the same soil depth ($P < 0.05$).

图5 不同水耕历史稻田田内和田埂土壤体积含水量

Fig. 5 Volumetric soil water content in paddy field and bund with different cultivation history

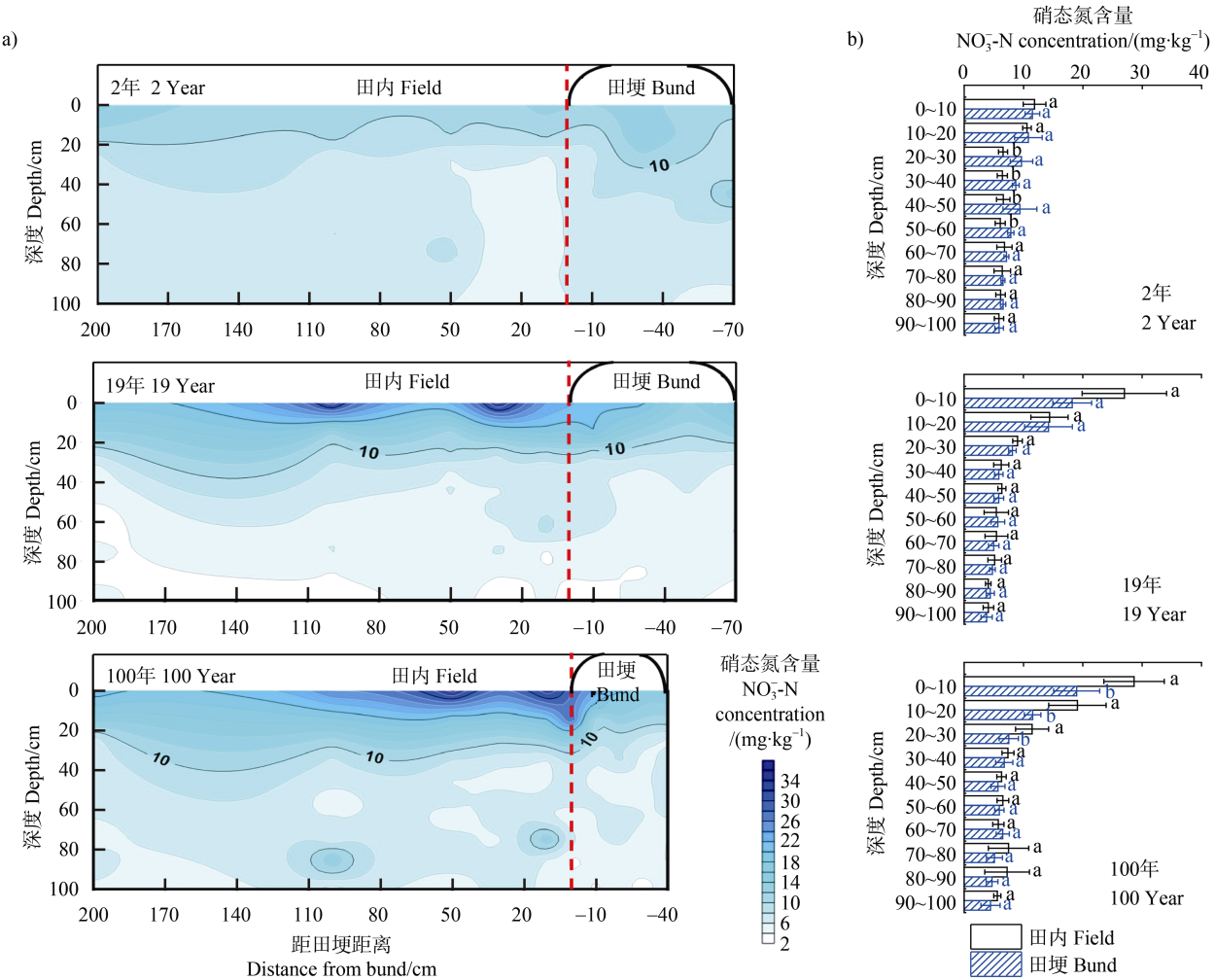
量差异较小。土壤含水量随水耕年限延长而增加, 2年、19年、100年稻田-田埂过渡区的平均含水量分别为 0.31 、 0.35 和 $0.40 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。此外, 这种增加趋势对于表层土壤更为明显, 100年稻田 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层的含水量分别为2年和19年的1.95倍和1.09倍。三种水耕年限稻田田内与田埂土壤含水量也存在差异, 2年、19年、100年田内土壤平均含水量分别为田埂的1.05倍、1.03倍、1.11倍, 且这种差异对于表层土壤更为明显。方差分析结果表明, 田内与田埂的含水量差异较小, 仅100年稻田样地的 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层存在显著差异。

2.6 稻田-田埂过渡区可溶性无机氮含量分布特征

水耕历史影响了稻田-田埂过渡区硝态氮分布特征(图6)。随土壤深度增加, 田内和田埂的硝态氮含量均呈现先下降后趋于稳定的趋势, 但19年和

100年稻田下降幅度更大。硝态氮含量随水耕年限的增加而升高, 2年、19年、100年稻田的硝态氮平均含量分别为 8.33 、 8.70 和 $10.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 且表层土壤 ($0 \sim 20 \text{ cm}$) 硝态氮含量随水耕年限的延长增加更为明显, 100年稻田表层土壤硝态氮含量为2年和19年的1.93倍和1.15倍; 而 30 cm 以下土层硝态氮含量随水耕年限增加变化较小。随着水耕年限的增加, 田内与田埂土壤硝态氮含量发生分异, 且这种差异在 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层更为明显。方差分析结果表明: 对于2年样地, 在 $20 \sim 60 \text{ cm}$ 土层表现为田埂高于田内; 19年样地田埂与田内各土层均无显著差异; 对于100年样地, 田内 $0 \sim 30 \text{ cm}$ 土层硝态氮含量高于田埂。

水耕作用也影响土壤铵态氮的分布特征(图7), 由于铵态氮含量在数值上远小于硝态氮含量, 因此



注：不同字母表示同一深度的土壤硝态氮含量存在显著性差异 ($P<0.05$)。Note: Different alphabets demonstrate the significant difference in soil NO_3^- -N concentration of the same soil depth ($P<0.05$) .

图 6 不同水耕历史稻田田内和田埂土壤硝态氮含量

Fig. 6 Soil NO_3^- -N concentration in paddy field and bund with different cultivation history

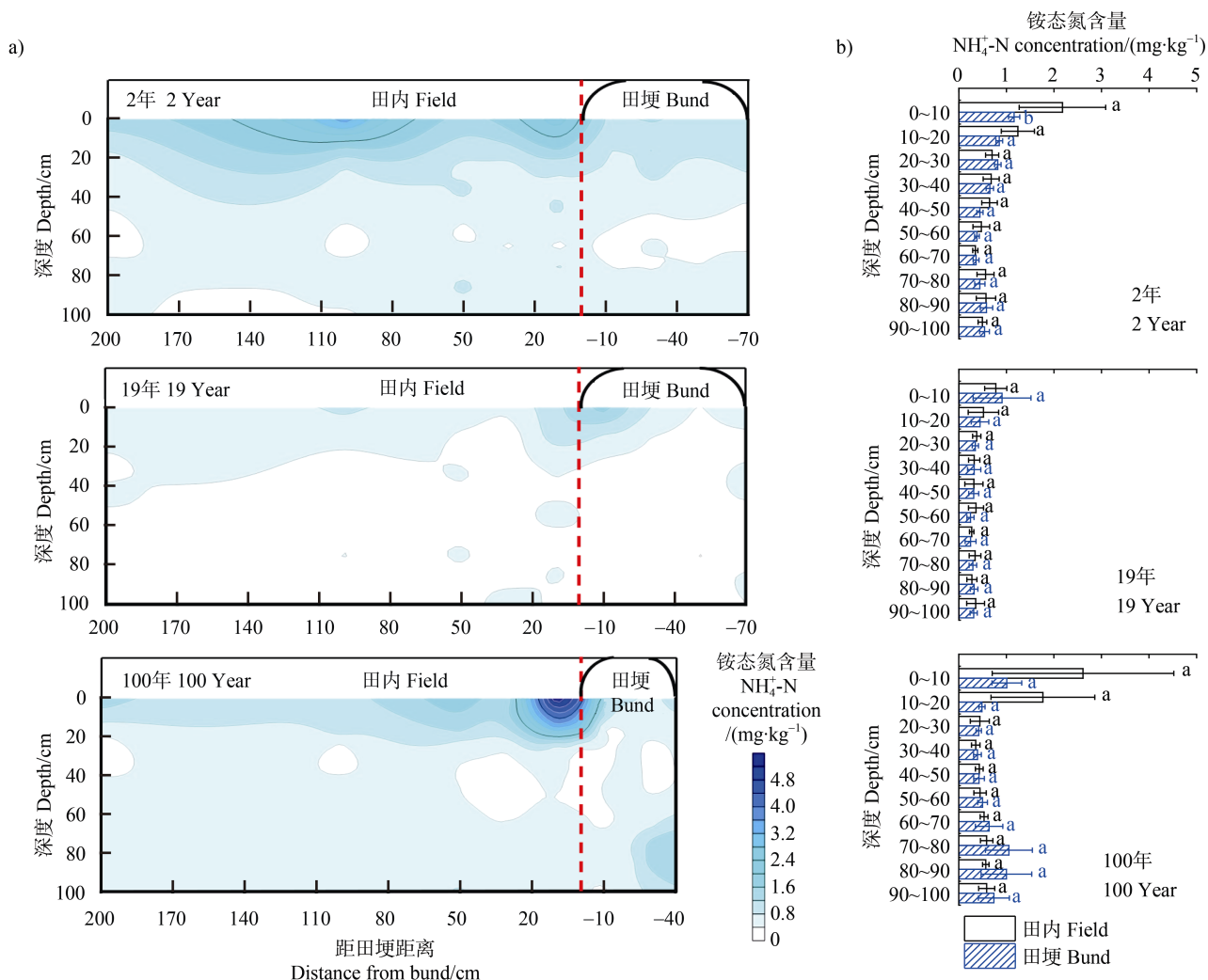
这种影响与硝态氮相比要小得多。随着土壤深度的增加,2 年和 19 年稻田铵态氮含量逐渐降低,而 100 年样地呈现先降低后增加的趋势。100 年稻田内 0~20 cm 土层铵态氮含量明显高于 2 年和 19 年稻田,分别是其含量的 1.21 倍和 2.60 倍。三种年限样地田内与田埂铵态氮含量差异较小,仅 2 年样地 0~10 cm 土层存在显著差异。

3 讨论

3.1 水耕历史对田内和田埂区域土壤容重和孔隙分布的影响机制

耕作活动与生物活动会显著影响稻田-田埂过

渡区的土壤物理性质。耕作层土壤在水稻种植前会被破碎、泥浆化,导致其容重降低^[22]。此外,由于每年有大量的作物根系与秸秆输入,耕作层土壤有机质含量升高,这有利于微团聚体的形成^[23],进一步降低了土壤容重。而耕作层下方土壤受到耕牛或耕作器具的强烈压实,其容重快速增加、大孔隙急剧减少;随着深度的增加,土壤受到压实作用减弱,土壤容重和大孔隙变化速率减缓。Jansson 和 Lennartz^[24]对比了 3 年、20 年和 100 年稻田的土壤容重,发现犁底层的容重随水耕年限的增加而增大;Yi 等^[22]和张中彬^[25]也有类似的发现。人类踩踏也会对田埂土壤造成一定的压实,但主要作用在田埂表层,因此田埂表层土壤容重 ($1.19\sim1.29\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 要



注：不同字母表示同一深度的土壤铵态氮含量存在显著性差异 ($P < 0.05$)。Note: Different alphabets demonstrate the significant difference in soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration of the same soil depth ($P < 0.05$).

图 7 不同水耕历史稻田田内和田埂土壤铵态氮含量

Fig. 7 Soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in paddy field and bund with different cultivation history

略大于田内 ($1.14 \sim 1.21 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)。由于田埂受到的压实作用较田内弱得多, 因此其容重和孔隙的变化小于田内。尽管人类踩踏对田埂硬质层及其以下土层的影响可能较小, 但 19 年稻田田埂硬质层 ($1.45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 的容重高于 2 年田埂 ($1.38 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)。这是由于田埂下方的土壤也会受到田内机械的侧向压实^[26], 但压力较田内小, 因此容重增加的速度较田内土壤慢。除翻耕与压实作用外, 土壤生物活动也影响了稻田-田埂区域的土壤物理性质。由于田埂杂草丰富 (图 8a)、且其根系较田内水稻的根系粗壮, 更为强烈的根系穿插作用可以更大降低土壤

容重, 且在每年凋亡后形成的大孔隙也更为丰富^[11]。此外, 在调查过程中, 于田埂下方的土壤中发现了较多的蚯蚓 (图 8b)、蝼蛄 (图 8c) 等土壤动物及其洞穴, 而田内很少。这是由于稻田内易淹水缺氧, 大型土壤动物偏爱在田埂处生活^[2, 10], 进而导致田埂土壤大孔隙更为丰富、容重更低。李胜龙^[7]对比了老稻田不同类型田埂的土壤物理性质和水流特征, 也认为田埂区域的土壤动物和根系活动是影响其物理性质的重要原因。以后可以通过开展更为详细的调查与测定, 以量化土壤动物和根系生长对田埂土壤大孔隙特征的影响。

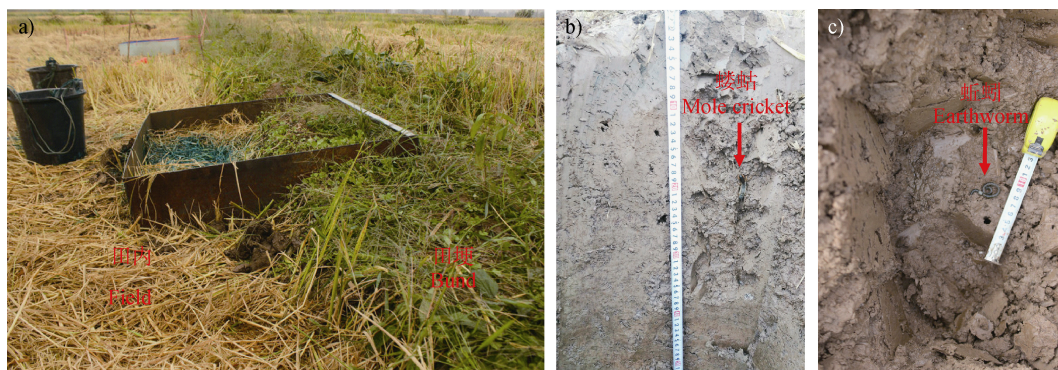


图 8 田内-田埂过渡区实景图 (a) 与田埂下方的土壤动物 (b, c)

Fig. 8 The pictures of the intermediate zone between paddy field and bund (a), and soil animals in paddy bund (b, c)

田内与田埂土壤性质的非同步变化导致其性质差异随耕作年限的增加而变化。为保证田埂结实,在田埂最初修建时会将其拍打压实,因此其初始容重略高于耕作层。随着耕作年限增加,田内受耕作活动影响而容重降低,而田埂表土层受到人类行走的踩踏导致容重缓慢增加,进而造成耕作层和表土层容重差异的增大。稻田内逐年的强烈压实作用使得耕作层之下形成了一个紧实的犁底层,而田埂受压实作用弱,因此容重较犁底层更小,总孔隙和大孔隙更多。2 年的耕作活动并未导致犁底层 ($1.40 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 和硬质层土壤容重 ($1.38 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 的差异明显;但 19 年耕作活动后,犁底层的容重 ($1.53 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 明显高于对应的硬质层 ($1.45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)。尽管 19 年稻田和 100 年稻田的犁底层容重相近,但 19 年稻田犁底层的厚度 (12 cm) 明显小于 100 年稻田 (20 cm),表明成熟犁底层的形成需要一个长期的过程^[22]。对于犁底层之下的土壤,也会受到轻微的耕作机械压实,导致 19 年和 100 年田内底土层容重略高于田埂,但这种差异较犁底层与硬质层的容重差异小。由于研究区地下水位较浅 (50~100 cm),下层土壤的高含水量导致蚯蚓和蝼蛄等土壤动物很少在 50 cm 以下土层活动,因此底土层的大孔隙分布较上层土体少。此外,100 年稻田田埂下方原有的犁底层也会发生退化,表现为硬质层的土壤容重 ($1.46 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) 小于田内的犁底层 ($1.52 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$),且大孔隙和总孔隙较犁底层多。一是由于新的田埂不再受到强烈的机械压实,二是由于田埂杂草更为丰富、生物活动更加频繁 (图 8),而这种退化可能导致田埂区域再次成为稻田水-氮的快速流失位点。

3.2 稻田-田埂过渡区土壤水-氮保持与流失特征分析

土壤容重和孔隙的变化会影响土壤的持水能力^[27]。由于稻田种植期的水势经常处于较高状态,因此本文主要关注较低吸力范围 (0~100 kPa) 的土壤持水能力。随着耕作年限的增加,耕作层土壤容重不断降低、中小孔隙持续增加,因此 100 年稻田耕作层的持水能力高于 2 年和 19 年稻田,且高于 100 年稻田的表土层。在水耕初期,2 年稻田犁底层与硬质层土壤性质相近,因此持水能力差异较小。随着水耕年限的增加,犁底层容重增加、孔隙减少,导致其持水能力较硬质层低。李胜龙等^[2]也认为犁底层较大的容重降低了低吸力时 (0~100 kPa) 的土壤含水量。而 100 年稻田田埂硬质层的退化也导致其在低吸力条件下 (0~30 kPa) 的持水能力高于犁底层。由于 2 年种植时间未能造成田埂与田内底土层土壤物理性质的显著差异,因此其持水能力相近;但 19 年和 100 年稻田底土层容重高于田埂,因此田内的持水能力更弱。当然,在 >100 kPa 或者更高的吸力值条件下,不同土层的持水能力也会发生变化^[28]。譬如,由于犁底层容重大,其微小孔隙多于耕作层,在高吸力条件下其持水能力也会较耕作层更高。

土壤容重和孔隙的变化还会影响土壤 K_s ^[28]。相关性分析表明,土壤 K_s 与容重呈显著负相关 ($r=-0.48$, $P=0.04$),而与直径 >0.3 mm ($r=0.75$, $P=0.00$) 和 >0.03 mm ($r=0.46$, $P=0.05$) 孔隙含量均呈正相关。新修田埂表土层土壤受人为拍实,大孔隙减少,因此 2 年稻田田内耕作层的 K_s ($14.25\sim106.23 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$) 高于田埂表土层 ($18.19\sim27.90 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$)。随着水耕

年限的增加, 尽管耕作层和表土层的容重差异在增大, 但大孔隙差异在减小, 最终导致 K_s 差异减小(图 4)。由于 2 年稻田犁底层与硬质层土壤物理性质相近, 因此其 K_s 差异也较小。而 19 年和 100 年稻田犁底层较硬质层容重更高、大孔隙更少, 因此其 K_s 较硬质层低。Janssen 和 Lennartz^[8]对比了 20 年和 100 年稻田和田埂的土壤物理性质, 也发现 20 年 ($0.79 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$) 和 100 年犁底层 ($0.16 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$) 的 K_s 远低于田埂对应土层 (13.3 和 $6.3 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$)。由于底土层受机械压实作用小, 因此 3 种农田的容重差异较小, 导致 2 年和 19 年稻田田内与田埂 K_s 差异较小。而 100 年田埂存在的时间更长, 生物活动更为频繁, 直径 $>0.3 \text{ mm}$ 和 $>0.03 \text{ mm}$ 的孔隙度均高于田内底土层(表 2), 进而导致其 K_s 较田内高(图 4)。

土壤持水能力和导水性能的改变也会影响稻田水-氮流失过程及其分布特征^[14]。虽然氮肥只在稻田内施用, 但田埂区域的氮素含量与田内相近, 表明大量氮素迁移至田埂区域, 未能被水稻吸收。由于土壤黏粒矿物易吸附 NH_4^+ 离子, 因此 NH_4^+-N 不易随着水流向下迁移, 形成表层高而下层低的特点^[29]。而 NO_3^- 离子易随水流动, 需重点关注水流驱动的 NO_3^--N 流失过程。对于 2 年新稻田, 由于犁底层尚未完全形成, 整个剖面均表现为较弱的持水能力与较高的 K_s , 水分和 NO_3^--N 在田内与田埂均易发生垂直渗漏。因此, 2 年稻田剖面的含水量和 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层的 NO_3^--N 含量远低于 19 年和 100 年稻田, 且在 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层无明显的水分与 NO_3^--N 聚集特征。对于 19 年和 100 年稻田, 犁底层的 K_s 低, 是限制稻田内水-氮渗漏的关键土层。因此, 土壤水分和 NO_3^--N 在犁底层以上明显聚集。而田埂区域硬质层的容重低、大孔隙多, 且 K_s 高, 因此水-氮更易通过田埂区域渗漏^[7], 造成田埂表层土壤的硝态氮聚集效应没有田内明显。虽然 19 年和 100 年稻田的田内与田埂土壤性质发生了较大分异, 但水分与硝态氮浓度的显著差异仅出现在 100 年的 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层。一是由于 19 年的犁底层发育还不够完善^[22], 其中的大孔隙会导致水分和氮素穿透犁底层下渗流失; 二是由于含水量与氮素浓度是一个快速动态变化的指标, 还需要通过长时间序列监测以准确量化其差异。

为减少稻田-田埂过渡区的水分流失, Patil 等^[26]

认为通过改变田埂的位置可以有效解决这个问题。由于犁底层的弱透水性, 水分不易发生垂直渗漏, 老稻田新修的田埂下方有犁底层的存在, 田埂区域的水分垂直渗漏可以得到有效阻挡。但随着时间的增加, 原犁底层逐渐退化, 田埂会再次成为了稻田水-氮快速流失的位点。虽然研究发现田埂是稻田水-氮流失的重要位点, 但现有结果尚不能量化田埂对稻田水-氮流失的贡献, 后期将借助田间原位监测数据, 结合数值模拟的方法进行量化。

4 结 论

耕作与生物活动影响了稻田-田埂过渡区土壤的物理性质。随着水耕年限的增加, 耕作层的容重降低、中小孔隙增加; 犁底层与硬质层的容重增加、大孔隙减少。100 年稻田新修田埂的硬质层发生了退化, 表现为容重降低、大孔隙增加。田内与田埂土壤物理性质变化的不同步, 导致其水力学性质的差异发生变化。随着水耕年限增加, 耕作层和表土层的 K_s 差异减小; 犁底层和硬质层 K_s 差异增大, 19 年和 100 年稻田硬质层的 K_s 较犁底层高, 持水性能较犁底层强; 随水耕年限的增加, 田埂底土层持水能力高于田内, 且 100 年田埂底土层具有更高的 K_s 。土壤物理性质的改变影响了稻田的水-氮分布特征与流失过程。2 年稻田的水-氮含量最低, 水分与 NO_3^--N 均易通过田内和田埂流失; 而 19 年和 100 年稻田的土壤水分和 NO_3^--N 在耕作层聚集, 水-氮更易通过田埂区域渗漏。100 年稻田硬质层的退化导致其田埂区域再次成为水-氮快速流失的位点。

参考文献 (References)

- [1] Xu B L, Shao D G, Fang L Z, et al. Modelling percolation and lateral seepage in a paddy field-bund landscape with a shallow groundwater table[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 214: 87—96.
- [2] Li S L, Zhang H L, Liu M X, et al. Characteristics of soil water transport and holding capacity in paddy and inner field-bund transition zones[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31 (2): 122—128. [李胜龙, 张海林, 刘目兴, 等. 稻田——田埂过渡区土壤水分运动与保持特征[J]. *水土保持学报*, 2017, 31 (2): 122—128.]
- [3] Ju X T, Zhang C. The principles and indicators of rational N fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58 (1):

- 1—13. [巨晓棠, 张翀. 论合理施氮的原则和指标[J]. 土壤学报, 2021, 58 (1): 1—13.]
- [4] Janssen M, Lennartz B. Water losses through paddy bunds: Methods, experimental data, and simulation studies[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 369 (1/2): 142—153.
- [5] Patil M D, Das B S. Assessing the effect of puddling on preferential flow processes through under bund area of lowland rice field[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 134: 61—71.
- [6] Neumann R B, Polizzotto M L, Badruzzaman A B M, et al. Hydrology of a groundwater-irrigated rice field in Bangladesh: Seasonal and daily mechanisms of infiltration[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45 (9): W09412.
- [7] Li S L. Characteristics of macropores distribution and water-nitrogen leakage in the intermediate zone between paddy field and ridge[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2018. [李胜龙. 稻田—田埂过渡区土壤大孔隙分布与水氮渗漏特征[D]. 武汉: 华中师范大学, 2018.]
- [8] Janssen M, Lennartz B. Characterization of preferential flow pathways through paddy bunds with dye tracer tests[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72 (6): 1756—1766.
- [9] Huang H C, Liu C W, Chen S K, et al. Analysis of percolation and seepage through paddy bunds[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 284 (1/2/3/4): 13—25.
- [10] Li S L, Yi J, Liu M X, et al. Characteristics of preferential flow in the intermediate zone between paddy field and ridge[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (5): 1131—1142. [李胜龙, 易军, 刘目兴, 等. 稻田—田埂过渡区土壤优先流特征研究[J]. 土壤学报, 2018, 55 (5): 1131—1142.]
- [11] Fried O, Kühn I, Schrader J, et al. Plant diversity and composition of rice field bunds in Southeast Asia[J]. *Paddy and Water Environment*, 2018, 16 (2): 359—378.
- [12] Cao Z H. Origin and evolution of irrigated rice fields and related ancient and present paddy soil's quality in China[M]. Beijing: Science Press, 2016. [曹志洪. 中国灌溉稻田起源与演变及相关古今水稻土的质量[M]. 北京: 科学出版社, 2016.]
- [13] Huang L M, Thompson A, Zhang G L, et al. The use of chronosequences in studies of paddy soil evolution: A review[J]. *Geoderma*, 2015, 237/238: 199—210.
- [14] Zhang J, Liu M X, Yi J, et al. Profile characteristics of soil properties and water/nitrogen distribution in paddy fields with different cultivation years[J]. *Soils*, 2019, 51 (6): 1188—1195. [张君, 刘目兴, 易军, 等. 不同植稻年限土壤剖面基本性质与水-氮分布的关系[J]. 土壤, 2019, 51 (6): 1188—1195.]
- [15] Hubei Provincial Bureau of Statistics. Hubei Statistical Yearbook[J]. Beijing: China Statistics Press, 2020. [湖北省统计局. 湖北统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2020.]
- [16] Li X X. Research on short-term effects of dryland to paddy under the land consolidation process on farmland soil environment[D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2020. [李肖肖. 旱改水整治对农田土壤环境的短期影响研究[D]. 江苏徐州: 中国矿业大学, 2020.]
- [17] Zhao Y J, Huang J L, Wang L H, et al. Extraction of rice planting areas in Jiangnan plain based on spatiotemporal fusion NDVI and phenological characteristics[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29 (2): 424—433. [赵亚杰, 黄进良, 王立辉, 等. 基于时空融合 NDVI 及物候特征的江汉平原水稻种植区提取研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29 (2): 424—433.]
- [18] Cheng D J, Zhang Y L. Soil physics experiment instruction[M]. Beijing: China Water Power Press, 2012. [程东娟, 张亚丽. 土壤物理实验指导[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.]
- [19] Chen X Q, Sun Y F, Luo J H, et al. Comparison of methods for determination of ammonium nitrogen in farmland water[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2010, 51 (3): 26—27. [陈晓群, 孙玉芳, 罗健航, 等. 农田水中铵态氮测定方法比较[J]. 宁夏农林科技, 2010, 51 (3): 26—27.]
- [20] Wang M, Li D, Liang Y H, et al. Determination of nitrate-nitrogen with ultraviolet spectrophotometry[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34 (S1): 231—234. [王曼, 李冬, 梁瑜海, 等. 紫外分光光度法测定水中硝酸盐氮的试验研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34 (S1): 231—234.]
- [21] Sun M, Huang Y X, Sun N, et al. Advance in soil pore and its influencing factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46 (1): 233—238. [孙梅, 黄运湘, 孙楠, 等. 农田土壤孔隙及其影响因素研究进展[J]. 土壤通报, 2015, 46 (1): 233—238.]
- [22] Yi J, Qiu W W, Hu W, et al. Effects of cultivation history in paddy rice on vertical water flows and related soil properties[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 200: 104613.
- [23] Wang X, Qi J Y, Zhang X Z, et al. Effects of tillage and residue management on soil aggregates and associated

- carbon storage in a double paddy cropping system[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 194: 104339.
- [24] Janssen M, Lennartz B. Horizontal and vertical water and solute fluxes in paddy rice fields[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 94 (1): 133—141.
- [25] Zhang Z B. Characteristics of cracks in reddish paddy soil and its consequences on preferential flow[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. [张中彬. 红壤性水稻土裂隙特征及其对优势流的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.]
- [26] Patil M D, Das B S, Bhadoria P B S. A simple bund plugging technique for improving water productivity in wetland rice[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 112(1): 66—75.
- [27] Qiao J B, Zhu Y J, Jia X X, et al. Estimating the spatial relationships between soil hydraulic properties and soil physical properties in the critical zone (0-100 m) on the Loess Plateau, China: A state-space modeling approach[J]. Catena, 2018, 160: 385—393.
- [28] Hu W, Tabley F, Beare M, et al. Short-term dynamics of soil physical properties as affected by compaction and tillage in a silt loam soil[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17 (1): 1—13.
- [29] Cameron K C, Di H J, Moir J L. Nitrogen losses from the soil/plant system: A review[J]. Annals of Applied Biology, 2013, 162 (2): 145—173.

(责任编辑：檀满枝)