

稻田—田埂过渡区土壤优先流特征研究*

李胜龙 易军 刘目兴 张君 杨燕 张海林[†]

(地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079)

摘要 为揭示田埂对稻田—田埂过渡区土壤水分渗漏的影响, 对比不同位点(田内、过渡带和田埂)优先流特征差异, 采用室外亮蓝染色示踪方法, 对江汉平原典型稻田—田埂过渡区进行研究。结果表明: 过渡区土壤染色面积比(SAR)随深度的增加呈波动下降, 其中 0~20 cm 土层 SAR 较高, 占剖面总 SAR 的 53.85%~88.55%。不同位点土壤 SAR 差异明显, 0~20 cm 土层平均 SAR 表现为田内>过渡带>田埂, 20 cm 以下各位点 SAR 均较低, 但田埂平均 SAR 高于田内。各位点水平剖面染色结果与垂直染色结果能较好对应, 且随着深度增加, 土壤染色区域急剧减少。各位点染色路径数(SPN)与 SAR 显著相关, 田埂中、下层土壤 SPN 均高于田内。染色路径宽度(SPW)结果显示, 0~20 cm 田内以 10~80 mm 和 >80 mm SPW 为主, 过渡带和田埂 >80 mm SPW 较少, 均以 <10 mm 和 10~80 mm 为主。各位点 SPW 的差异反映在水流类型上, 田内为非均质指流—高相互作用大孔隙流, 过渡区和田埂以混合作用大孔隙流—高相互作用大孔隙流为主。水分渗漏路径结果显示, 田内水分由过渡带和田埂的垂直和侧向渗漏较强, 且田沟田埂侧向流较田间田埂明显。田埂是稻田水分快速流失的主要区域, 加剧了稻田水肥流失和水环境污染风险。本研究可为稻田水分保持和制定合理施肥、灌溉等措施提供依据。

关键词 优先流; 染色示踪; 染色面积比; 染色路径宽度; 侧向流; 稻田—田埂过渡区

中图分类号 S152.7; S157.1

文献标识码 A

水稻是人类赖以生存的主要粮食作物, 其种植范围分布较广, 全世界有超过 50% 的人口以大米为主食^[1]。受水稻生长及增产需要, 每年需灌溉大量淡水并施加大量化肥及农药^[2]。一方面, 由于稻田(Paddy field)耕作层土壤受人为耕作影响, 土壤大孔隙分布较广, 优先流作用强烈, 加速农药、化肥等对地下水的污染^[3-5]; 另一方面, 长期耕作使得土壤受机械压实, 易在耕作层下形成质地紧实的犁底层^[6-7], 田内水分受犁底层阻挡, 垂直渗漏量较少, 转而以侧向流形式散失^[8-9]。

田埂(Ridge)位于稻田四周, 一般可分为两种, 即修筑于两块稻田之间的田间田埂和修筑于稻田与灌溉沟渠之间的田沟田埂。其中, 田间田埂的修建主要便于农事劳作行走以及田块区分, 而田沟田埂还具有配合沟渠进行灌溉与排水的功能。虽然田埂占田内面积比率较小, 但其受耕作活动影响较小, 穴居动物活动频繁, 土体内孔洞较多, 导致大孔隙分布较广, 优先流较田内更强烈^[10-11]。研究表明, 水稻生育期通过田埂区域流失的水分可占灌溉和降水总量的 30% 以上^[10, 12]。田间水分通过田埂的快速渗漏, 不仅造成大量灌溉水的流失, 也加剧地表水和地下水的污染程度^[6, 13]。而且, 田埂类型的差异, 可能造成不同的水流路径和优先流强度。当相邻稻田地形差异较小时, 水分通过田间田埂时主要在田埂正下方发生垂直入渗; 而田间水分流经田沟田埂区域时, 水分会以垂直渗漏和侧向流的形式快速散失^[8, 10]。此

*国家自然科学基金项目(41601215)和中央高校基本科研业务费(CCN16A05015, CCNU17TS0001)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41601215) and Central China Normal University Fund (Nos. CCNU16A05015 and CCNU17TS0001)

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

作者简介: 李胜龙(1993—), 男, 江西景德镇人, 硕士研究生, 主要从事稻田土壤水文研究。E-mail: lslccnu1993@163.com
收稿日期: 2017-12-07; 收到修改稿日期: 2018-01-25; 优先数字出版日期(www.cnki.net):

外,田沟田埂近沟渠面暴露于大气,导致其较田间田埂受到更强烈的土壤动物活动和杂草生长影响,这种影响可能会造成更多的土壤大孔隙分布和更强烈的优先流现象,而已有研究较少考虑田埂类型差异。

目前,研究土壤优先流的方法有多种,其中,染色示踪法是较为常用的研究方法^[14-16]。该方法将染色剂以一定比例溶解于水并均匀喷洒于土壤表层以进行土壤原位定点染色试验,通过获取并处理土壤染色剖面数字图像以分析土壤水流形态学特征。该过程不仅可直接观察水分和溶质在土壤中的运动轨迹,还能半定量化分析土壤水分运动及优先流特征差异^[15, 17]。而在染色剂的选择上有多种^[18],由于食品级亮蓝具有高渗透性、无毒性、低吸附性、与土壤颜色差异大且价格低廉等特点,目前被广泛用于野外染色示踪试验^[19-20]。

江汉平原是我国重要商品粮生产基地,水稻为主要作物类型。近年来,由于三峡大坝的修建和“南水北调”中线工程的实施,三峡下游长江段和丹江口水库下游汉江段夏季输水减少,导致江汉平原地区水稻生长季的灌溉水源减少,稻田季节性干旱频率增加^[21-22]。此外,水稻种植中过量施肥引起的氮素流失导致该地区水体富营养化问题凸显^[23]。本研究以江汉平原典型稻田—田埂过渡区土壤为研究对象,通过田间染色示踪和室内样品分析等方法,对比该过渡区不同位点土壤染色特征差异,揭示稻田—田埂过渡区优先流特征差异与发生机制,研究结果可为制定合理的稻田管理措施以减少稻田水氮渗漏提供科学依据。

1 材料与方方法

1.1 研究区概况

江汉平原(110°30'~116°06'E, 29°22'~31°30'N)位于中国湖北省中南部,两湖平原的北部,系长江和汉江泛滥淤积形成的冲积平原,总面积为 $3.76 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该区地处暖温带季风气候区,雨热同季,年平均气温 16.1℃,无霜期 243~275 d。多年平均降水量为 1 100~1 400 mm。其中,年降水量的 70%~85%集中在 4—9 月。研究区土壤母质以近现代河流冲积物和湖相沉积物为主,地下水位多年平均 1.0 m 左右。水稻为该区最主要作物类型,种植历史悠久。稻田土壤类型多为潜育型和潴育型水稻土,典型剖面产状为 Ap—P—C,土壤质地为壤土和黏壤土。稻田耕作层土壤团粒状发育良好,犁底层多为块状结构,有根锈条纹^[24]。

1.2 样地选取

研究样点位于华中师范大学江汉平原农田监测站(112°20'E, 29°23'N),地处江汉平原中南部,站区农田以双季稻种植和水稻/小麦轮作为主。在经多次现场调查和当地农民访谈后,选定同一稻田(双季稻种植;早、晚稻生育期分别为 4—7 月和 7—11 月)两种不同类型稻田—田埂过渡区(田间田埂与田沟田埂过渡区)开展试验^[25]。试验稻田长约 60 m(田间田埂),宽约 27 m(田沟田埂),水稻种植年限>100 a。田埂均为 20 世纪 80 年代初期农村土改分田时修建,之后并未移动,仅在每年耕作时对田埂表层土壤进行填补与修缮。

野外染色示踪试验与土壤样品采集于 2016 年 4 月初开展,期间稻田尚未耕作。将位于两块稻田之间的区域命名为“田间田埂过渡区”(田埂高 10 cm,宽 45 cm),将位于稻田和沟渠之间的田埂命名为“田沟田埂过渡区”(田埂高 15 cm,宽 60 cm)^[25]。将过渡区划分为“田内”、“过渡带”和“田埂”等不同位点,其中“过渡带”介于田内和田埂之间,宽 20 cm。

1.3 染色示踪与图像处理

以亮蓝溶液为示踪剂于田间田埂和田沟田埂过渡区开展染色示踪实验。沿水平和垂直方向分别挖取染色剖面^[8]。每个剖面挖取完毕后,立即放置标尺进行遮光拍照。参照 Janssen 和 Lennartz^[8]及 Weiler 和 Flühler^[26]等染色图像处理办法,获得土壤染色面积比(Stained area

ratio, SAR) 和染色路径 (Stained path) 等水流特征参数。其中, SAR 是指剖面内染色面积占剖面面积的百分比, 反映水流在整个土壤剖面的变化规律^[26]。而染色路径指垂直染色剖面的二值化图像内, 每行像元中单个独立的或多个连续的染色像元, 均视为独立的染色路径 (染色像元个数≥1)。染色路径一般可分为染色路径数 (Stained path number, SPN) 和染色路径宽度 (Stained path width, SPW), 共同反映优先流的连通性和分支性^[27]。其中, SPN 指垂直染色图像内, 所统计的每行像元中独立染色路径数量, SPW 指每条独立染色路径对应的土壤实际水平宽度^[26]。结合稻田土壤实际染色状况, 确定 SPW 划分标准为<10 mm、0~80 mm 和>80 mm, 以表 1 为依据划分不同位点优先流类型。

表 1 优先流分类标准

Table 1 Criteria for classification of preferential flows

优先流类型 Type of preferential flow	染色流态 Pattern of dyed flow	染色路径宽度比率 Ratio of staining path width (SPW)	
		<10 mm	>80 mm
均质流 Homogeneous flow		<20%	>60%
非均质指流 Heterogeneous figure flow		<20%	30-60%
混合作用大孔隙流 Mixed macropore flow		20~50%	<20%
低相互作用大孔隙流 Poorly interacted macropore flow		>50%	>20%
高相互作用大孔隙流 Highly interacted macropore flow		<20%	<30%

1.4 数据处理

本文垂直染色剖面形态学参数 (SAR、SPN 与 SPW) 和优先流类型结果均为 5 张剖面图片处理得出的平均值。数据用 Excel 2016 处理, 并用 SPSS 22 进行相关性分析和单因素方差分析, 以 Origin 9.0 作图。

2 结果

2.1 过渡区土壤剖面染色面积比

由过渡区各位点总染色面积比盒状图可知, 各位点 SAR 整体上体现为过渡带>田埂>田内 (图 1)。各位点 SAR 随深度的增加而波动下降。0~20 cm 土层 SAR 较高, 占整个染色面积的 53.85%~88.55%, 其中, 田内在 8~10 cm SAR 达到 90.00%以上; 20 cm 以下过渡区各位点 SAR 较低, 整体上低于 15.00%。

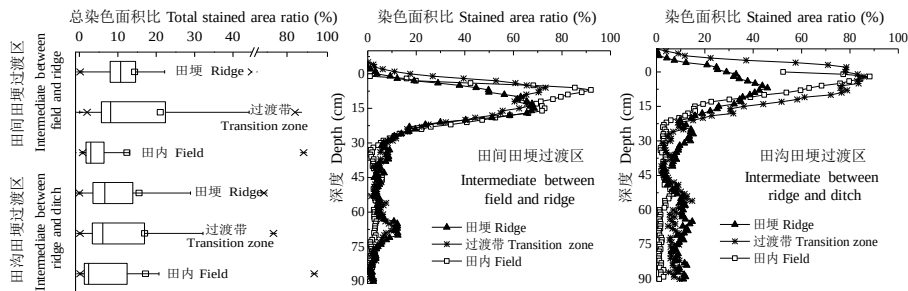


图 1 过渡区垂直剖面不同位点染色面积比

Fig.1 Stained area ratio (SAR) of the vertical profiles in the intermediate zones relative to sampling sites

田内、过渡带和田埂 SAR 在不同深度土层差异显著 (图 1, 表 2)。0~10 cm 各位点 SAR 随土壤深度增加而增加, 且平均 SAR 表现为田内>过渡带>田埂。10~30 cm 土层各位点 SAR 急剧下降, 且田内下降最快, 下降幅度达 96.65%~99.17%, 过渡带次之 (88.31%~93.21%), 田埂最慢 (69.36%~87.51%)。30~90 cm 土层平均 SAR 表现为田埂>过渡带>田内。如表 2, 各发生层土壤平均 SAR 显示田埂在 18 cm 以下区域高于田内, 且 16~35 cm 土层田沟田埂过渡区田埂位点 SAR 为田内的 4.19 倍。

表 2 不同深度土层染色图像形态学参数

Table 2 Morphological parameters of the dye tracer image relative to soil layer

采样区 Sampling area	位点 Location	深度 Depth (cm)	SAR (%)	SPN	SPW (%)		
					<10 mm	10~80 mm	>80 mm
田内 Field	田内 Field	0~18	59.39gh	22.00f	10.64f	39.56g	11.01c
		18~37	5.16ab**	5.00a**	2.97ab	3.17abc	0.26a
		>37	2.29a**	4.00a**	1.84a	0.48a	0.00a
田间田埂 Ridge between fields	过渡带 Transition zone	0~18	64.32h*	12.00c*	14.91g	42.42g	4.03a
		18~30	10.35bc**	5.00a**	5.71cd	2.94abc	0.00a
	田埂 Ridge	>30	6.89abc**	4.00a**	5.43c	1.54ab	0.00a
		0~18	34.06e**	20.00e**	14.08g	19.11e	0.16a
		18~30	13.13c**	11.00c**	7.22d	5.53bcd	0.01a
		>30	8.93bc**	8.00b**	5.89cd**	2.99abc	0.00a
田沟田埂 Ridge alongside ditch	过渡带 Transition zone	0~16	57.57g*	16.00d*	18.64i*	39.62g	1.54a
		16~35	20.55d**	9.00b**	9.33ef**	8.66d	0.06a
	田埂 Ridge	>35	4.34ab**	4.00a**	3.59b**	0.69ab	0.00a
		0~16	45.46f**	20.00ef**	17.06h**	32.20f	0.41a
		16~35	21.64d**	13.00c**	8.70e**	7.27cd	0.00a
		>35	5.22ab**	6.00a**	3.94b**	1.13ab	0.21a

注: SPN 与 SPW 分别表示染色路径数和染色路径宽度; 数值表示各发生层形态学参数的平均值; 字母 a~i, 表示各土层间差异; *和**分别表示染色面积比 (SAR) 与染色路径数 (SPN) 在 0.05 水平上和 0.01 水平上显著相关 Note: SPN and SPW stands for stained path number and stained path width, respectively. The data are means of the morphological parameters of the genetic horizon; The alphabets from a to i demonstrate difference between soil layers; The symbol of * and ** means significant correlation between SAR and SPN at the 0.05 level and the 0.01 level

各过渡区水平剖面 SAR 与垂直剖面 SAR 能较好对应, 随着土壤深度增加, 田内和过渡带位点水平 SAR 急剧降低, 而田埂则出现先增加后急剧降低趋势, 且 20 cm 以下土层各位点水平 SAR 表现为田埂>过渡带>田内 (图 2)。田内 0~5 cm 水平剖面 SAR 最高, 平均达 64.11%~72.78%, 且染色区域呈连续分布; 5 cm 以下田内水平剖面 SAR 急剧下降, 而田埂位点平均水平剖面 SAR 为田内的 2.04 倍~2.27 倍, 且 20 cm 染色区域以不连续点状分布为主。

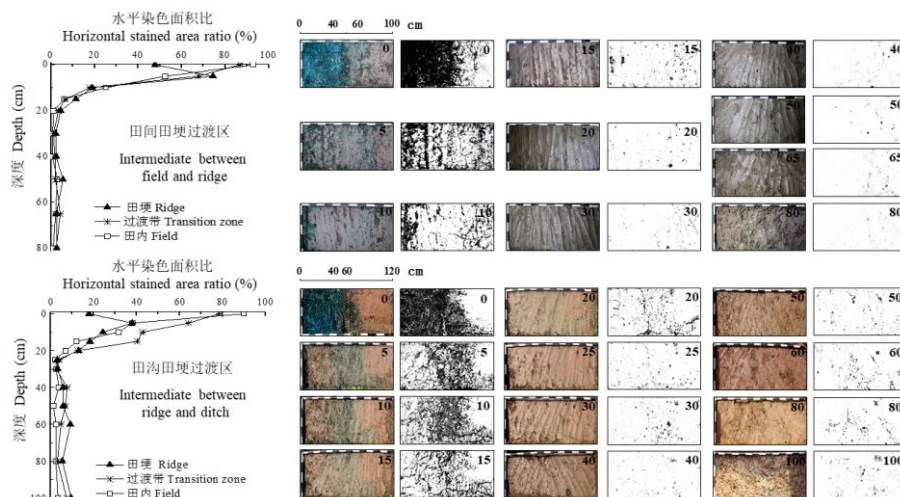


图2 过渡区水平染色面积比及染色剖面

Fig.2 The horizontal stained soil area ratio and sections of dyed soil in the intermediate zones

2.2 过渡区染色路径数与染色路径宽度分布

过渡区各位点平均 SPN 均随深度增加呈现先增加后波动下降趋势，且在深度 5~15 cm 处 SPN 最大（图 3）。在 0~10 cm 田内平均 SPN 最多，最高达 31 条；随着深度增加，在深度 20 cm 以下土层 SPN 表现为田埂>过渡带>田内，其中，田沟田埂过渡区的田埂位点 20~80 cm 平均达 10 条，为田内和过渡带的 2.00 倍。不同过渡区田埂位点 SPN 虽在 0~20 cm 差异较小，但 20 cm 以下土层田沟田埂位点 SPN 逐渐高于田间田埂，虽田间田埂在 60~80 cm 土层有小峰值出现，但整体上依旧小于田沟田埂。

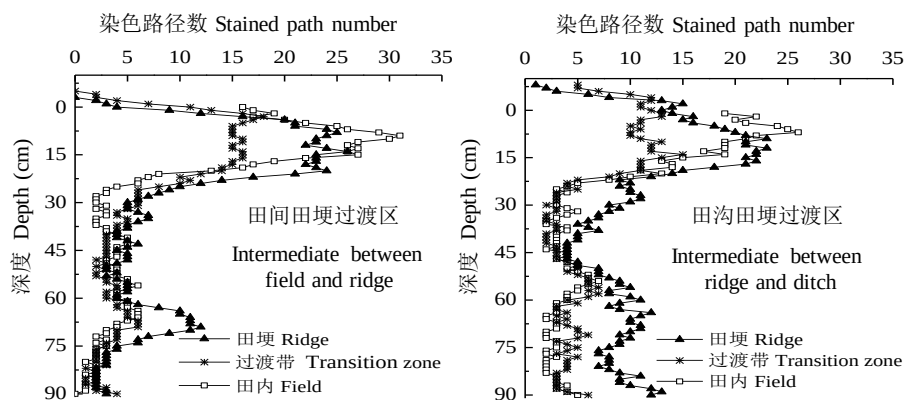


图3 过渡区不同位点染色路径数

Fig.3 Stained path number (SPN) in the intermediate zones relative to sampling sites

过渡区 SPW 显示，各位点染色区域主要集中于 0~20 cm 土层，占整体 SAR 的 53.58%~88.55%，其中 10~80 mm SPW 占多数；各过渡区 20 cm 以下土层 SPW 均以<10 mm 和 10~80 mm 为主（图 4）。不同位点同深度土层 SPW 差异较大，在 0~20 cm 土层，田内 SPW 以 10~80 mm 和>80 mm 为主；而过渡带和田埂则以<10 mm 和 10~80 mm 为主，>80 mm 整体占比较低（0.23%~4.20%）。20 cm 以下土层，田内、过渡带和田埂 SPW 均以<10 mm 和 10~80 mm 为主，但过渡带和田埂明显高于田内，其中，田埂<10 mm SPW 平均值为田内的 2.70 倍~2.94 倍。

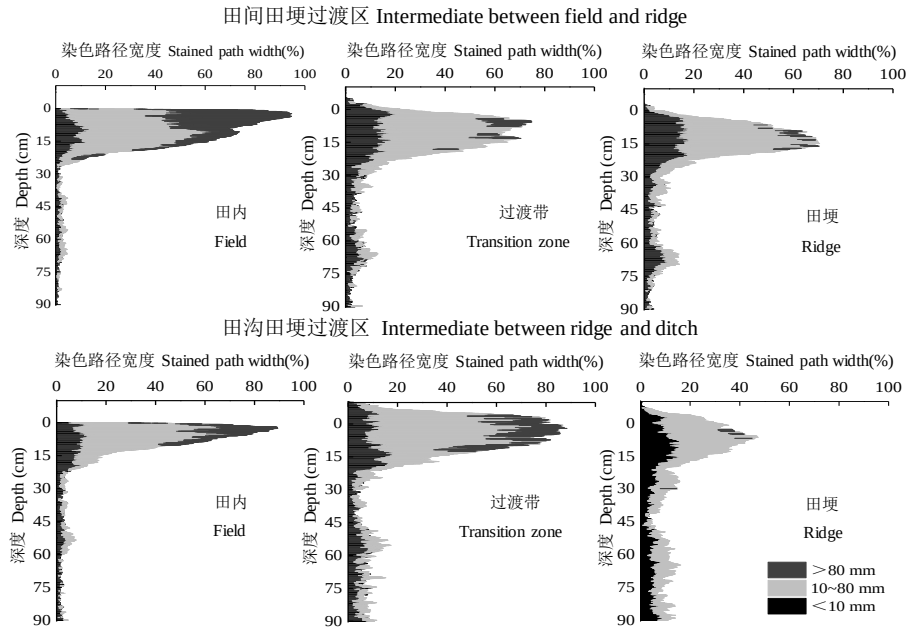
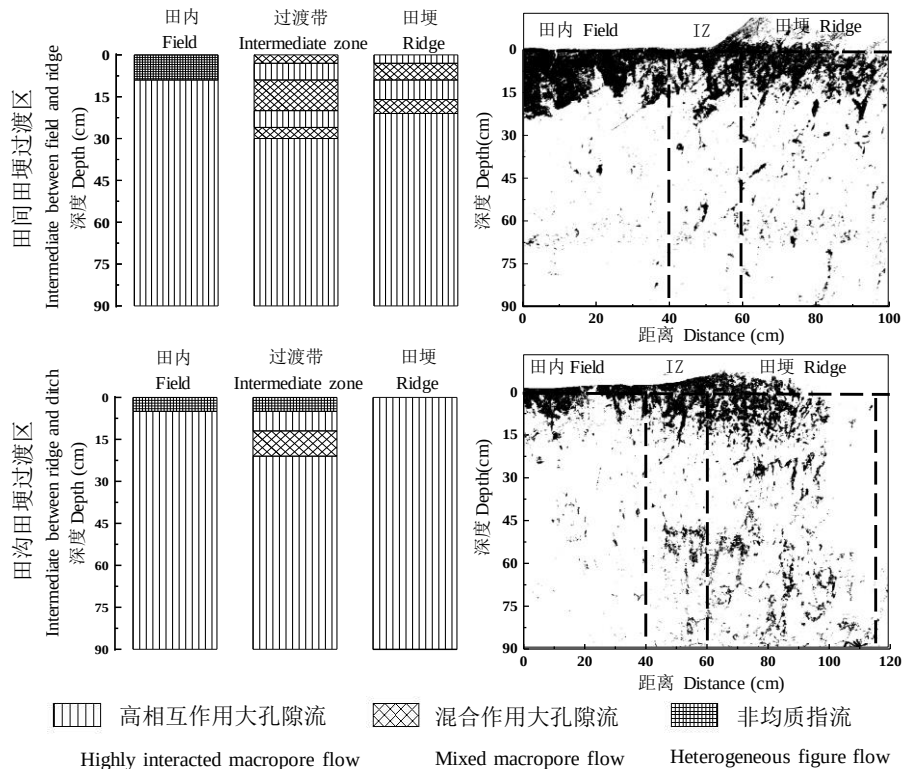


图4 过渡区不同位点染色路径宽度

Fig.4 Stained path width (SPW) in the intermediate zones relative to sampling sites

2.3 过渡区不同位点优先流类型与水流特征

过渡区各位点水流类型均呈现明显的优先流特征,且整体上以高相互作用大孔隙流为主(图5)。过渡区不同位点 0~30 cm 土层优先流类型差异较大,田内表现为非均质指流—高相互作用大孔隙流,过渡带和田埂位点多以混合作用大孔隙流—高相互作用大孔隙流相间分布,且非均质指流仅在表层 0~5 cm 少量分布。30 cm 以下土层,过渡区各位点优先流类型差异不大,均为高相互作用大孔隙流。两种田埂位点 0~30 cm 土层优先流类型有较大差异,田间田埂混合作用大孔隙流分布较多,而田沟田埂位点则仅有高相互作用大孔隙优先流分布。



注: TZ 为过渡带; 下同 Note: TZ stands for transition zone. The same below

图 5 过渡区不同位点水流类型

Fig.5 Type of water flow in the intermediate zones relative to sampling sites

如图 6, 各过渡区水分通过田埂区域的垂直渗漏和侧向渗漏明显高于田内区域。尽管田内 0~20 cm 土层被染色较多, 但在 20 cm 以下染液分布极少, 表明田内该深度几乎无垂直入渗水流。由过渡带流向田埂的侧向水流较为明显, 不仅过渡带表层染色较多, 且同深度土层, 田埂区域垂直方向染色区域较田内多; 水平方向上, 水流能横跨整个田埂, 侧流明显。另外, 不同类型田埂水流特征差异明显, 田沟田埂在 0~20 cm 染色区域少于田间田埂, 但 20 cm 以下染色区域逐渐高于田间田埂, 且田沟田埂侧向流更为明显。

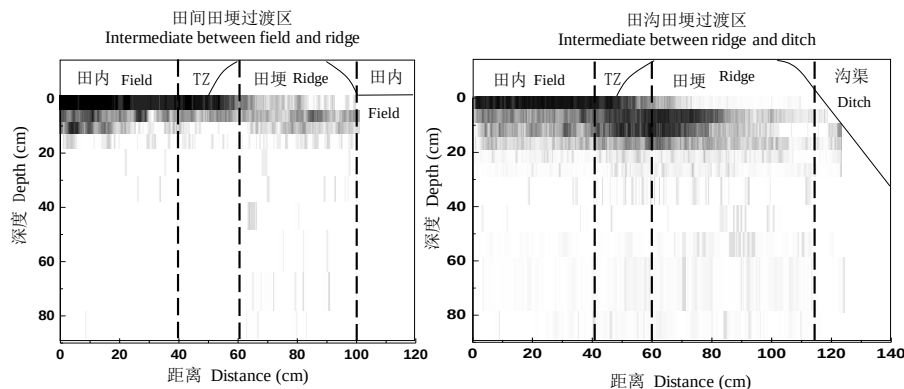


图 6 过渡区优先流特征

Fig.6 Characteristics of preferential flow in the intermediate zones

3 讨论

3.1 耕作与生物活动对田埂过渡区水分入渗和染色分布比的影响

耕作活动影响犁底层的形成, 进而造成田埂过渡区的染色分布特征分异^[28]。田内耕作层以下土层 (20~35 cm) 受耕作机械压实作用明显, 易形成结构紧实的犁底层^[28-29]。传统田埂的修筑采用田内表层土壤, 若稻田开垦前未进行过农业耕作, 则田埂下部无犁底层, 导致田埂较高的水分渗漏速率^[8]。而当田埂修筑于原稻田耕作层之上时, 稻田原犁底层则位于田埂之下。在田埂修建后, 田埂区域不再受耕作压实, 仅在种植期间会对其表层进行修缮, 田埂之下的原犁底层会长期保存。由于长期不受农耕机械压实作用, 严格意义上讲田埂的该层不能再称为犁底层, 故 Janssen 和 Lennartz^[13]将该层定义为“硬质层 (Hard pan)”。但长期未耕作使得残留于田埂的根系腐烂, 硬质层逐渐形成多孔结构, 导致田埂该层的渗透性能高于田内^[8, 13], 最终导致过渡带和田埂下方土壤比田内具有更高的 SAR。而垂直和水平染色剖面的 SAR 呈现一致的分布规律, 进一步证实了研究结果的可靠性。

农业耕作、土壤内穴居动物活动及植物根系分布等因素均会影响土壤孔隙的垂直分布, 进而导致不同位点土壤染色分布特征差异^[30-31]。田内耕作层容重小, 总孔隙高, 且耕作后作物残茬保留于表层土壤, 水分易通过大孔隙和秸秆残茬形成的优先流路径快速垂直渗漏。但结构紧实的犁底层阻挡了水分的垂直入渗, 增加了染色剂在耕作层的滞留时间, 进而导致田内耕作层 SAR 最高, 犁底层及其以下土层 SAR 极低。Janssen 和 Lennartz^[8]对整个稻田—田埂过渡区的染色试验结果也表明, 受田内犁底层的影响, 田内 20~30 cm 处 SAR 急剧降低, 特别是长期耕作的老稻田。Patil 等^[7]的研究结果表明, 受翻耕影响, 田内犁底层阻挡水分的垂直入渗, 使得田内水分侧向流渗漏明显。在整个稻田—田埂过渡区, 由于大量水分在犁底层之上滞留, 而田内染色喷洒区和非喷洒区被铁板隔开, 导致耕作层中存储的大量染液将以侧向流形式由过渡带流向田埂, 田埂和田内孔隙的差异会影响过渡区的染色分布特征。Kukal

和 Aggarwal^[32]研究表明, 稻田的泥浆化和机械压实作用虽然导致稻田总水分流失量降低 54.00%~58.00%, 但通过田埂区域流失的水量占比却显著提高, 这是由于田埂土壤的高导水性能导致田内大量水分通过该区快速流失。由于过渡带介于田内和田埂之间, 表层土壤干湿交替非常频繁, 导致多裂隙发育且孔隙连通性较强。染色实验时也在过渡带发现了较多平行于田埂方向的裂隙, 导致染液施加后更易通过这些裂隙快速入渗。且 Greve 等^[33]通过灌溉条件下土壤裂隙发育过程的研究表明, 由裂隙产生的土壤大孔隙能极大促使土壤优先流的产生。因此, 过渡带和田埂优先流作用整体上较田内明显。

3.2 耕作与生物活动对田埂过渡区水流路径及优先流类型的影响

土壤孔隙特征的差异不仅影响 SAR, 还会影响表征水流类型的 SPN 和 SPW 等参数^[34-35]。SPN 和 SPW 能共同反映优先流的连通性与分支性, SPN 越多, 表明有效的水流路径越多, 但过高的 SPN 也会伴随着较小的 SPW, 意味着大孔隙的水流与土壤水交换作用较弱, 水流类型表现为低相互作用的大孔隙流。而 SPW 越宽, 则反映孔隙中的水分与孔隙周围土体的水分交换作用更明显, 往往表现为基质流或高相互作用大孔隙流。田内表层土壤受耕作影响强烈, 土质较为疏松, 孔隙较多, 单位土体的比表面积较大, 且水分入渗较快, 另外下层土体对水分垂直入渗的阻挡也增加了染液与表层土壤充分接触的时间, 故其 SPN 较高且 SPW 较宽 (以 10~80 mm 和 >80 mm 为主), 反映在优先流类型上表现为非均质指流 (基质流)。犁底层对水分垂直渗漏的阻碍作用导致田内中、下层土壤 SAR 和 SPN 急剧降低。另外, 由于下层土体较为紧实, 导致大孔隙和土壤基质的水分交换较弱, 染色区主要分布在大孔隙周围, 因此 SPW 多以 <10 mm 为主。同时, 由于亮蓝染液喷洒于田内, 染液需要由过渡带侧向渗漏于田埂, 且田埂的高渗透性导致染液滞留时间较田内短, 使得田埂 0~20 cm 土层 SAR 和 SPW 低于田内。田埂中、下土层穴居动物 (蚯蚓和蝼蛄等) 的活动导致更多优先流路径的形成^[11], 而田内犁底层以下土层染色区域较少, 因此, 田埂 SAR 和 SPN 均较田内高, 大孔隙流现象明显。田埂硬质层土壤容重比田内低^[25], 表明其土壤较田内松散, 因此大孔隙和土壤的水分交换作用更强, 导致田埂该层土壤比田内的 SPW 更宽。闫佳亮^[36]等通过对农田土壤优先流的研究也发现, 昆虫对土体的扰动不仅增加土壤大孔隙含量, 同时也极大促使优先流的产生。此外, 野外调查过程中, 还发现田埂有较多杂草生长, 表明其土壤中比田内位点存在更多根系, 而根孔也是导致优先流产生的重要原因^[31]。

3.3 不同类型田埂过渡区水分流失途径与渗漏特征

田间田埂和田沟田埂的灌溉条件、植物根系和地形特征等因素差异, 导致两者的土壤理化性质、大孔隙和水分流失特征也存在一些区别。田间田埂处于两块稻田之间, 其两侧长期处于淹水状态, 不利于土壤动物长期活动; 田沟田埂靠沟一侧在灌溉期淹水, 而其他时间暴露于大气, 土壤动物活动更为频繁, 导致田沟田埂更多的动物孔穴分布。此外, 在水稻种植期间, 农民一般会持续清除近稻田侧田埂的杂草, 而较少清除田沟田埂外侧杂草, 因此, 田沟田埂杂草生长更为茂盛, 根孔形成的优先流路径较田间田埂更多。动物孔穴和植物根系的共同作用导致田沟田埂优先流作用较田间田埂明显, 表现为 20 cm 以下土层更大的 SAR 和 SPN, 以及更宽的 SPW。由于田间田埂介于两稻田之间, 两侧均受田内灌溉的影响, 且研究区地势平坦, 田块间地势差异小, 因此跨田埂的水分交换较小, 即使跨过该类型田埂也不会导致水分的流失, 使得水分通过田间田埂以垂直渗漏为主^[10]; 而田沟田埂位于存在地势差的稻田和灌溉沟之间, 水分不仅会在田埂下方垂直入渗, 也会以侧向流形式于田埂外侧流失^[6, 10]。田间水分经过田埂区域的快速流失, 不仅造成灌溉水分的损失, 还会加速氮素的流失, 造成地下水污染等问题。后期将通过水稻生长季田埂区域的原位定点监测试验, 量化田埂对稻田水氮流失的贡献率。

4 结 论

受耕作活动、土壤动物活动和植物根系等因素影响,稻田—田埂过渡区不同位点土壤水流特征分异明显。由于犁底层的存在,田内水分的垂直渗漏量显著减少,导致田内中、低层土壤 SAR 和 SPN 极低。过渡带和田埂位点受耕作影响较小,蚯蚓、蝼蛄等穴居动物活动强烈,土壤优先流强于田内,其中、低层土壤 SAR 和 SPN 表现为田埂>过渡带>田内。在各位点的 SPW 和水流类型上,田内耕作层染色路径较过渡带和田埂宽,为非均质指流—高相互作用大孔隙流;而过渡带和田埂位点较田内有更多宽度较窄的染色路径分布,其优先流类型为混合作用大孔隙流—高相互作用大孔隙流。受田埂土壤类型差异影响,田沟田埂优先流现象较田间田埂明显,20 cm 以下土层表现为更大的 SAR、SPN 和 SPW;受田埂地形特征差异影响,田间田埂水分流失以快速垂直渗漏为主,而田沟田埂区域水分快速流失以垂直渗漏和跨田埂侧向流两种路径发生;田沟田埂区域水分流失风险高于田间田埂。综上,稻田水分通过田埂区域的快速渗漏,加剧了稻田水分流失风险。

参 考 文 献

- [1] Li Y, Barker R. Increasing water productivity for paddy irrigation in China. *Paddy & Water Environment*, 2004, 2(4): 187-193
- [2] Zhu J G, Liu G, Han Y, et al. Nitrate distribution and denitrification in the saturated zone of paddy field under rice/wheat rotation. *Chemosphere*, 2003, 50(6): 725-732
- [3] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils revisited. *Water Resources Research*, 2013, 49(6): 3071-3092
- [4] 陈效民, 黄德安, 吴华山. 太湖地区主要水稻土的大孔隙特征及其影响因素研究. *土壤学报*, 2006, 43(3): 509-512
Chen X M, Huang D A, Wu H S. Characteristics of macropores and their affecting factors of major paddy soils in Taihu Lake region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 509-512
- [5] 盛丰, 方妍. 土壤水非均匀流动的碘-淀粉染色示踪研究. *土壤*, 2012, 44(1): 144-148
Sheng F, Fang Y. Study on preferential soil water flow using iodine-starch staining method (In Chinese). *Soils*, 2012, 44(1): 144-148
- [6] Janssen M, Lennartz B. Horizontal and vertical water and solute fluxes in paddy rice fields. *Soil & Tillage Research*, 2007, 94(1): 133-141
- [7] Patil M D, Das B S, Bhadoria P. A simple bund plugging technique for improving water productivity in wetland rice. *Soil & Tillage Research*, 2011, 112(1): 66-75
- [8] Janssen M, Lennartz B. Characterization of preferential flow pathways through paddy bunds with dye tracer tests. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(6): 1756-1766
- [9] 杨燕, 易军, 刘目兴, 等. 不同水耕年限稻田土壤水分运动特征研究. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(2): 257-263
Yang Y, Yi J, Liu M X, et al. Characteristics of soil water transport in different aged paddy fields (In Chinese). *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(2): 257-263
- [10] Huang H C, Liu C W, Chen S K, et al. Analysis of percolation and seepage through paddy bunds. *Journal of Hydrology*, 2003, 284(1/4): 13-25
- [11] Patil M D, Das B S. Assessing the effect of puddling on preferential flow processes through under bund area of lowland rice field. *Soil & Tillage Research*, 2013, 134(8): 61-71

- [12] Walker S H, Rushton K R. Verification of lateral percolation losses from irrigated rice fields by a numerical model. *Journal of Hydrology*, 1984, 71(3): 335-351
- [13] Janssen M, Lennartz B. Water losses through paddy bunds: Methods, experimental data, and simulation studies. *Journal of Hydrology*, 2009, 369(1/2): 142-153
- [14] Luo L, Lin H, Halleck P. Quantifying soil structure and preferential flow in intact soil using x-ray computed tomography. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(4): 1058-1069
- [15] Allaire S E, Roulier S, Cessna A J. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques. *Journal of Hydrology*, 2009, 378(1): 179-204
- [16] 张中彬, 彭新华. 土壤裂隙及其优先流研究进展. *土壤学报*, 2015, 52(3): 477-488
Zhang Z B, Peng X H. A review of researches on soil cracks and their impacts on preferential flow (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3): 477-488
- [17] Alaoui A, Goetz B. Dye tracer and infiltration experiments to investigate macropore flow. *Geoderma*, 2008, 144(1): 279-286
- [18] 盛丰. 土壤优先流运动的示踪成像技术与分形模型模拟. 北京: 中国水利水电出版社, 2015
Sheng F. Characterizing preferential flow using iodine-starch staining method and active region model (In Chinese). Beijing: China Water & Power Press, 2015
- [19] Laine-Kaulio H, Backn ä S, Koivusalo H, et al. Dye tracer visualization of flow patterns and pathways in glacial sandy till at a boreal forest hillslope. *Geoderma*, 2015, 259/260: 23-34
- [20] 徐宗恒, 徐则民, 曹军尉, 等. 土壤优先流研究现状与发展趋势. *土壤*, 2012, 44(6): 905-916
Xu Z H, Xu Z M, Cao J W, et al. Present and future research of preferential flow in soil (In Chinese). *Soils*, 2012, 44(6): 905-916
- [21] 郑红星, 刘昌明. 南水北调东中两线不同水文区降水丰枯遭遇性分析. *地理学报*, 2000, 55(5): 523-532
Zheng H X, Liu C M. Analysis on Asynchronism-synchronism of regional precipitation in planned South-to-North water transfer areas (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 523-532
- [22] 刘静. 基于遥感技术的三峡库区农业干旱评价研究. 重庆: 西南大学, 2008
Liu J. A study of Three Gorge Region agriculture drought evaluation based on remote sensing (In Chinese). Chongqing: Southwest University, 2008
- [23] 曹志洪. 施肥与水体环境质量-论施肥对环境的影响(2). *土壤*, 2003, 35(4): 2-7
Cao Z H. Effect of fertilization on soil health quality-Effect of fertilization on environment quality (2) (In Chinese). *Soils*, 2003, 35(4): 2-7
- [24] 陈芳, 张海涛, 王天巍, 等. 江汉平原典型土壤的系统分类及空间分布研究. *土壤学报*, 2014, 51(4): 761-771
Chen F, Zhang H T, Wang T W, et al. Taxionmy and spatial distribution of soils typical of Jiangnan Plain (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(4): 761-771
- [25] 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. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 122-128
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 (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*. 2017, 31(2): 122-128
- [26] Weiler M, Flühler H. Inferring flow types from dye patterns in macroporous soils. *Geoderma*, 2004, 120(1/2): 137-153
- [27] 田香姣. 四面山两种土地利用方式下的优先流特征. 北京: 北京林业大学, 2015
Tian X J. Characteristics of preferential flow under two kinds of land use patterns in simian mountain (In Chinese). Beijing: Beijing Forestry University, 2015
- [28] 张中彬. 红壤性水稻土裂隙特征及其对优势流的影响. 北京: 中国科学院大学, 2013

- Zhang Z B. Characteristics of cracks in reddish paddy soil and its consequences on preferential flow (In Chinese). Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2013
- [29] Kasteel R, Garnier P, Vachier P, et al. Dye tracer infiltration in the plough layer after straw incorporation. *Geoderma*, 2007, 137(3/4): 360-369
- [30] Kirchhof G, Priyono S, Utomo W H, et al. The effect of soil puddling on the soil physical properties and the growth of rice and post-rice crops. *Soil & Tillage Research*, 2000, 56(1/2): 37-50
- [31] 刘目兴, 杜文正. 山地土壤优先流路径的染色示踪研究. *土壤学报*, 2013, 50(5): 871-880
Liu M X, Du W Z. To investigate soil preferential flow paths in mountain area using dye tracer (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5): 871-880
- [32] Kukal S S, Aggarwal G C. Percolation losses of water in relation to puddling intensity and depth in a sandy loam rice (*Oryza sativa*) field. *Agricultural Water Management*, 2002, 57(1): 49-59
- [33] Greve A, Andersen M S, Acworth R I, et al. Investigations of soil cracking and preferential flow in a weighing lysimeter filled with cracking clay soil. *Journal of Hydrology*, 2010, 393(1):105-113
- [34] Alaoui A, Lipiec J, Gerke H H. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. *Soil & Tillage Research*, 2011, 115(5): 1-15
- [35] 戴翠婷, 刘窑军, 王天巍, 等. 三峡库区高砾石含量紫色土优先流形态特征. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 103-108
Dai C T, Liu Y J, Wang T W, et al. Characteristics of preferential flow under high-content rock fragment purple soil in the Three Gorges Reservoir area (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*. 2017, 31(1): 103-108
- [36] 闫加亮, 赵文智, 张勇勇. 绿洲农田土壤优先流特征及其对灌溉量的响应. *应用生态学报*, 2015, 26(5):1454-1460
Yan J L, Zhao W Z, Zhang Y Y. Characteristics of the preferential flow and its response to irrigation amount in oasis cropland (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*. 2015, 26(5):1454-1460

Characteristics of Preferential Flow in the Intermediate Zone between Paddy Field and Ridge

LI Shenglong YI Jun LIU Muxing ZHANG Jun YANG Yan ZHANG Hailin[†]

(Key Laboratory for Geographical Process Analysis & Simulation, Hubei Province,

College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract 【Objective】Studies available in the literature have shown that the ridges around the paddy fields are likely to lead to low water use efficiency and pollution of shallow groundwater. Preferential flow is a physical process of water and solutes moving along certain pathways, like pores and fissures in the soil, while bypassing the part of soil matrix and is ubiquitous in the paddy field under continuous flooding. Therefore, to study the status of preferential flow in paddy soil and its influencing factors may help quantify characteristics of water leakage in paddy fields and improve water and fertilizer utilization efficiency, and hence reduce the risk of pollution of shallow groundwater by agricultural chemicals in paddy regions. In order to elucidate effects of the ridges on soil water leakage in the intermediate zone between fields and ridges, comparison was made of different monitoring points in the field, transition zone and ridges for differences in characteristics of preferential flow. 【Method】Field bright blue dye tracer experiments were conducted of the soils in the two typical intermediate zones (i.e., the intermediate between field and ridge and the intermediate

between ridge and ditch) of > 100 years old paddy field in the Jiangnan Plain, Hubei Province. 【Result】 Results show that stained soil area ratio (SAR) fluctuated downwards with depth of the soil profile and a peak was observed in the 0~20 cm soil layer, accounting for 53.85%~88.55% of the total SAR of the soil profile; that the field was the highest in SAR in this soil layer, and followed by the transition zone, and the ridge; that although SAR was quite low in soil below 20 cm in depth at all the monitoring sites, the ridge was still 3.15 times as high as the field in mean SAR; that staining of the soil appeared quite consistent horizontally and vertically, that with increasing soil depth, the area of staining at horizontal levels gradually decreased from a plane to a dot. The ridge, impact in soil texture, was higher than the field in staining path number (SPN) that in the 0~29 cm soil layer. staining path width (SPW) varied in the range 10~80 mm and beyond, while in the soil layers down below, only a few paths <10 mm were observed; that the water flow in the field was mainly of the type of heterogeneous finger flow - highly-interacted macropore flow, while in the transition zone and ridge, it was mainly of the type of mixing macropore flow- highly-interacted macropore flow, for the SPW therein varied in the range of 10~80 mm and below. When water flowed from the field into the transition zone, it lost through seepage vertically and laterally, the two typical pathways, (i) via earthworm pores, root pores and fissures, which were more plentiful in the ridge, facilitating vertical and horizontal seepage of the water, while the plough pan in the field made it hard for the water to leach downwards, thus forcing the water to flow into the ridge and then percolate rapidly into deep soil layers; and (ii) further into ditches through the intermediate between ridge and ditch, of which the two were relatively different in elevation, so the water infiltrating into the ridge continued flowing vertically through the ridge and eventually into the ditch, besides percolating downwards. 【Conclusion】 Affected by the distribution of macropores in the field, transition zone and ridge, only a small amount of water in the field infiltrated through the plough pan and a large one lost through seeping laterally into the ridge and then percolating quickly and vertically into deep soil layers through macropores, thus leading to low water use efficiency and nitrogen pollution of water bodies. It is, therefore, essential to pay high attention to the influence of water flow in the ridges on leakage of soil moisture and solutes from paddy fields.

Key words Preferential flow; Dye tracer; Stained area ratio; Stained path width; Lateral water flow; Paddy field-ridge intermediate

(责任编辑: 陈荣府)