

黄河三角洲湿地植物根区优先流区和 基质流区土壤特性分布差异*

武亚楠¹⁾ 张英虎²⁾ 张振明^{1)†} 张明祥^{1)†}

(1)北京林业大学生态与自然保护学院,黄河流域生态保护国家林业和草原局重点实验室,100083,北京;

2)南京林业大学林学院,210037,江苏南京)

摘要 以黄河三角洲国家级自然保护区典型湿地植物盐地碱蓬根区土壤为研究对象,结合野外染色示踪实验和室内土壤性质测量实验,分析优先流区和基质流区土壤特性的分布差异,加深对湿地生态系统优先流对土壤影响的理解,对恢复湿地植被具有指导意义.结果表明:1)土壤有机碳、有机质、全氮和有效磷质量分数随着土壤深度的增加逐渐减小,土壤水质量分数随着土壤深度的增加先减小后增加,土壤全磷质量分数随土壤深度变化幅度较小.2)优先流区土壤有机碳、有机质、全氮和有效磷质量分数显著高于基质流区,两区土壤全磷质量分数不存在显著性差异.土壤深度为0~20 cm,优先流区土壤水质量分数高于基质流区;土壤深度>20~60 cm,基质流区土壤水质量分数高于优先流区,但差异均不显著.3)优先流区土壤有机碳、有机质、全氮和有效磷呈显著正相关,基质流区土壤有机碳、有机质和有效磷呈显著正相关.

关键词 优先流;盐地碱蓬;土壤;黄河三角洲湿地

中图分类号 Q89

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020435

优先流是一种常见的土壤水分运动形式,优先流是水分和溶质运移由均质转向非均质研究的标志,代表不平衡的水流运动过程^[1].水分和溶质绕过土壤基质区,沿着优先流路径快速穿透土壤层甚至到达地下水层,使得优先流路径内的水流运动和溶质运移速率远高于土壤基质区内的速率^[2-5].优先流表现形式主要包括大孔隙流、漏斗流和指流^[6-7].影响优先流的因素包括内在因素和外在因素,其中:内在因素主要包括土壤质地、土壤结构、土壤大孔隙度、土壤初始水质量分数、土壤密度、土壤有机质、植被根系、动物等;外在因素主要包括灌溉、耕作以及干湿冻融条件等^[1,6-9].例如:程金花等^[10]研究证明土壤深层质地较粗时,优先流路径越明显,在粉沙和黏质土壤中,大孔隙流现象更容易出现,优先流也更容易形成^[1];Kung等^[11]研究证明土壤初始水质量分数较低时,溶质穿透曲线持续时间更长,溶质运移速率更快,优先流现象越明显;土壤大孔隙与土壤基质孔隙、根孔隙通道、洞穴、裂隙甚至基岩缝隙相连通,共同组成复杂的连通孔隙网,构成优先流路径,

促进导水^[12].优先流的测定方法主要包括染色示踪技术、TDR测定技术、荧光示踪法、微张力测量技术、非侵入式影像获得技术和地下雷达探测技术等^[1,6].染色示踪技术是标记优先流路径的常见方法^[13-15],其中染色区是优先流区(preferential flow area, PF),未染色区是基质流区(soil matrix flow area, SM)^[16].

目前关于优先流的研究多集中在林地山区等区域^[17],关于湿地生态系统中优先流的发生及优先流区和基质流区的土壤特性差异很少有人研究.湿地是位于陆生生态系统和水生生态系统之间的过渡地带,其作为重要的生态系统,具有不可替代的功能.土壤特性与优先流间的关系是生态水文过程的重要组成部分.生态水文过程是湿地生态系统的基本要素,水文过程又影响着湿地内部各种关键生态因子的相互作用.因此,研究湿地内土壤特性与优先流的关系,能够加深对湿地植物根区土壤水流运动以及土壤特征反馈的理解,以此为湿地植物的保护与恢复提供支撑数据.

黄河三角洲是中国典型的滨海河口湿地,位于

* 国家自然科学基金资助项目(41771547);国家重点研发计划资助项目(2017YFC0505903)

† 通信作者:张振明(1979—),男,博士,副教授.研究方向:湿地生态水文. E-mail: zhenmingzhang@bjfu.edu.cn;
张明祥(1972—),男,博士,教授.研究方向:湿地保护与管理. E-mail: zhangmingxiang@bjfu.edu.cn

收稿日期:2020-08-17

海陆交互作用地带,是一个多功能的复杂生态系统,具有独特的生态价值和资源潜力.由于其海洋与河口交互性、海陆过渡性、新生性及生态脆弱性等突出特色,黄河三角洲湿地在世界范围湿地生态系统中具有较强的代表性^[18].因此,本文选取黄河三角洲湿地为实验样地,利用染色示踪的方法,研究盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)分布下优先流区和基质流区的土壤特性分布差异,以期加深对湿地生态系统优先流对土壤影响的理解,为湿地植物的保护和恢复提供科学依据.

1 研究区域概况

黄河三角洲国家级自然保护区(118°32′~119°20′E, 37°34′~38°12′N)地处山东省东营市境内,是在黄河携带大量泥沙和海水的不断冲刷、淤积的共同作用下形成,是我国暖温带最完整、最辽阔和年轻的湿地生态系统^[19].黄河三角洲国家级自然保护区内湿地类型多样,孕育了丰富的生物物种,包括维管植物 382 种,大型底栖动物 195 种,野生鸟类 368 种^[20].

黄河三角洲国家级自然保护区内草本植物占优,木本植物只有柳、柽柳等少数种类.盐生植物丰富,总计 71 种,这与该区土壤含盐量高、土壤盐碱化严重有密切关系.耐盐植物主要以柽柳和盐地碱蓬为主,其中盐地碱蓬是黄河三角洲湿地的先锋种和建群种,其分布广泛,形成了黄河三角洲独特的自然景观^[21].

2 研究方法

2.1 野外染色实验 于 2019 年 7 月选择黄河三角洲盐地碱蓬生长旺盛区域作为研究样区(119°03′E, 37°49′N),在地势较为平坦、湿地斑块常年无积水地段,设置 3 个研究点,研究区域位置见图 1-a.记录研究点海拔为 0、碱蓬株高为 0.2 m、覆盖度为 80%.同时除去试样地样方内杂草及枯落物,除杂过程中,尽量减少对土壤表面的扰动.在每个研究点设置 1.0 m×1.0 m 样方.以亮蓝溶液为染色示踪液,质量浓度为 4 g·L⁻¹,体积为 50 L,使用人工喷壶均匀施加至样方土壤表面,亮蓝染色示踪液施加完成,用塑料薄膜覆盖样方,以减少降雨冲刷或地表蒸发.待亮蓝染色液施加 24 h 之后,开挖垂向剖面,垂向剖面最低开挖深度视亮蓝最大染色深度而定.

垂向剖面中的染色区域为优先流区,未染色区域为基质流区.分别在染色区域和未染色区域,用标准环刀(100 cm³)取样,土壤深度梯度为 10 cm,每一土壤层染色区和未染色区 3 次重复取样,2 区内所取根系样品和土壤样品放至 4℃ 的冰箱内,以待样品分析.染色实验见图 1-b~d,其中图 1-d 为垂向剖面染色图.

2.2 室内土壤理化指标监测 土壤水质分数采用烘干法测定;土壤有机质质量分数测定采用丘林法,180℃油浴,用 K₂Cr₂O₇ 作为标准溶液,加入浓 H₂SO₄,在热油浴锅中加热,待试管沸腾时,煮沸冷却,滴加

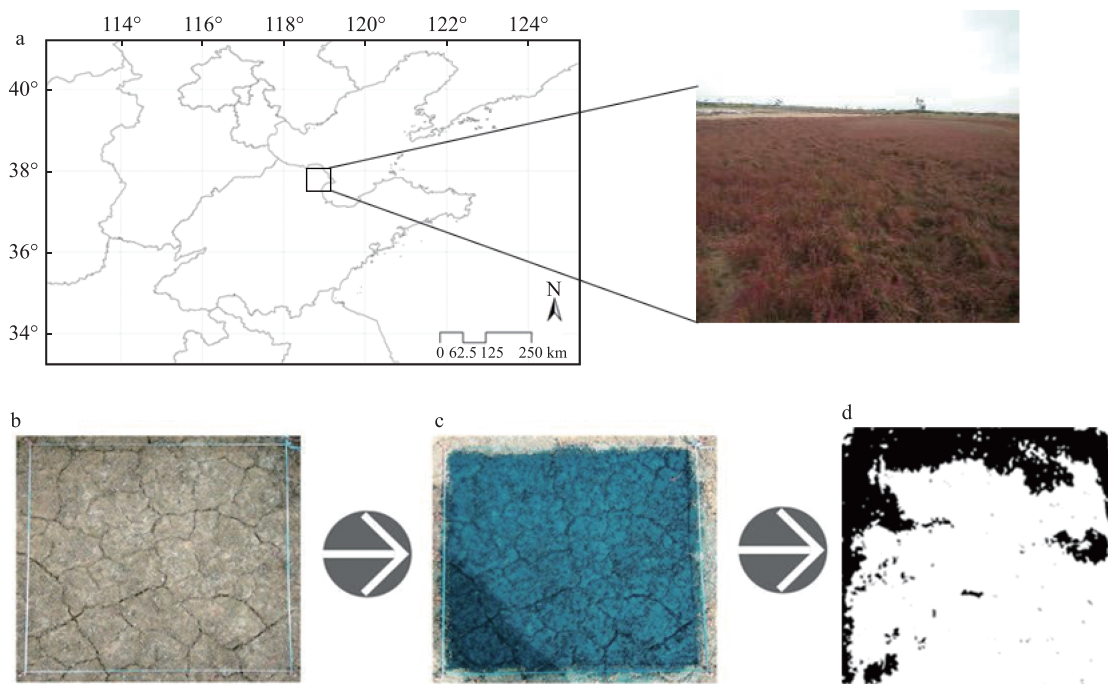


图 1 研究区位置及样地染色实验

邻菲罗啉指示剂,之后用 FeSO_4 滴定;土壤全氮采用凯氏法,用连续流动分析仪(Auto Analyzer 3)测定;全磷采用 NaHCO_3 浸提钼锑抗比色法;有效磷采用 Olsen 法,用紫外分光光度计(型号:UV2700)比色测定,波长选择 880 nm.

2.3 数据处理与分析 运用 Origin 2019 软件作图,采用 SPSS 23.0 软件对优先流区和基质流区不同深度土壤特征作单因素方差分析,对不同土壤理化性质作相关关系分析.

3 结果

3.1 优先流区和基质流区土壤有机碳和有机质质量分数变化 盐地碱蓬根区的优先流区和基质流区土壤有机碳质量分数随土壤深度变化见图 2-a. 基质流区的土壤有机碳质量分数随着土壤深度的增加而减小,基质流区 0~5、>5~10 和 >10~15 cm 的有机碳质量分

数分别为 (4.66 ± 1.00) 、 (3.43 ± 1.00) 和 $(2.25 \pm 0.60) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 优先流区和基质流区的土壤有机碳质量分数随深度的变化规律一致,其中,优先流区 0~5 cm 深度处土壤的有机碳质量分数最大,为 $(14.19 \pm 3.00) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 同一土壤深度土壤有机碳质量分数在优先流区在 0~5 和 >10~15 cm 处均高于基质流区. 总体来看,优先流区的土壤有机碳含量要显著高于基质流区.

盐地碱蓬根区的优先流区和基质流区土壤有机质质量分数随土壤深度变化见图 2-b. 优先流区和基质流区土壤有机质质量分数随着土壤深度的增加逐渐减小. 在优先流区 0~5 和 >10~15 cm 土壤深度处有机质质量分数均高于基质流区的土壤有机质质量分数. 土壤深度 0~5 cm 优先流区土壤有机质质量分数最大,为 $(24.45 \pm 4.00) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 土壤深度 >10~15 cm 基质流区土壤有机质质量分数最小,为 $(3.89 \pm 1.00) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 总体来看,优先流区的土壤有机质质量分数显著高于土壤基质流区的有机质质量分数.

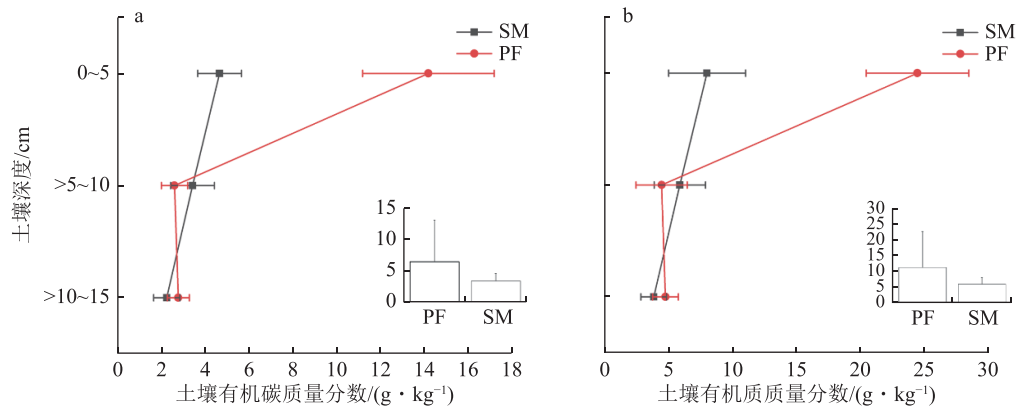


图 2 优先流区和基质流区土壤有机碳和有机质质量分数随土壤深度的变化

3.2 优先流区和基质流区土壤水质量变化 盐地碱蓬根区的优先流区与基质流区水质量分数对比见图 3. 总的来看,优先流区水质量分数为 $(0.21 \pm 0.20)\%$, 基质流区的水质量分数为 $(0.21 \pm 0.01)\%$, 优先流区的水质量分数较基质流区的水质量分数高,但是差异很小. 考虑到土壤剖面的不同深度,优先流区和基质流区水质量分数在不同土壤深度存在差异,不同土壤 2 区水分扩散效应也存在差异. 其中,在 0~10 和 >10~20 cm 土壤深度处,优先流区的土壤水质量分数高于基质流区. 当土壤深度为 >20~60 cm 时,基质流区的土壤水质量分数高于优先流区. 2 区最大水质量分数出现在优先流区土壤深度为 >10~20 cm 处,水质量分数为 $(0.23 \pm 0.01)\%$. 在优先流区,土壤水质量分数随着深度的增加先短暂增大再减小再增大至最初的水质量分数水平. 基质流区的土壤水质量分数随土壤深度的变化规律与基质流区基本一致.

盐地碱蓬根区的优先流区土壤水质量分数减去

基质流区土壤水质量分数的差值变化如图 4. 从图 4 中点的分布可以得到,优先流区土壤水质量分数大于基质流区的数值占比为 41%,而相比优先流区,基质流区的土壤水质量分数大的数值占比为 59%,说

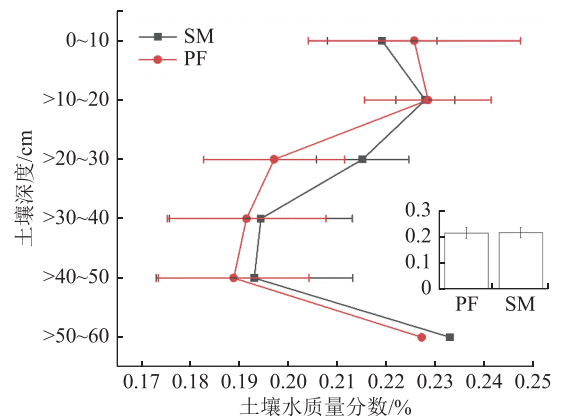


图 3 优先流区和基质流区土壤水质量分数随土壤深度的变化

明在收集的实验数据内,基质流区土壤水质量分数大的数值占比高.这是由于不同土壤深度优先流区和基质流区的水势压差存在差异,导致水文扩散能力不同,从而影响优先流区和基质流区的水分交换运动;因此,优先流区的水质量分数不一定比基质流区高.另外,基质流区虽未被染色,但是如果基质流区含有不流动的水体时,基质流区的水质量分数也会高于优先流区.

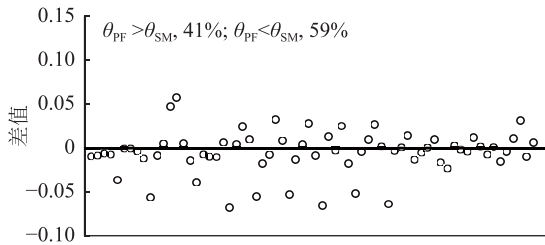


图 4 优先流区与基质流区土壤水质量分数差值

3.3 优先流区和基质流区土壤氮磷质量分数变化

盐地碱蓬根区的优先流区与基质流区土壤全氮质量分数随土壤深度的变化见图 5-a. 优先流区 0~5、>5~10 和 >10~15 cm 的土壤全氮质量分数分别为 (1.58 ± 0.40) 、 (0.27 ± 0.07) 和 $(0.23 \pm 0.08) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其随着土壤深度的增加而减小. 基质流区的全氮质量分数随土壤深度变化趋势与优先流区一致, 依次为

(0.47 ± 0.20) 、 (0.31 ± 0.10) 、 $(0.20 \pm 0.06) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 根据以上 2 区的土壤全氮质量分数可知, 在相同的土壤深度条件下, 优先流区的全氮质量分数要高于基质流区. 土壤全氮质量分数的最大值在优先流区的 0~5 cm 土壤深度处, 而最小值在基质流区的 >10~15 cm 土壤深度处. 总体来看, 优先流区的土壤全氮质量分数要显著高于基质流区.

盐地碱蓬根区的优先流区与基质流区土壤全磷质量分数随土壤深度的变化见图 5-b. 在优先流区, 土壤全磷质量分数在 0~5、>5~10 和 >10~15 cm 的土壤层分别为 (0.59 ± 0.03) 、 (0.51 ± 0.02) 和 $(0.53 \pm 0.02) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其随着土壤深度的增加先减小后增大. 在基质流区, 土壤全磷质量分数在 0~5、>5~10 和 >10~15 cm 的土壤层分别为 (0.57 ± 0.02) 、 (0.55 ± 0.03) 和 $(0.52 \pm 0.03) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其随着土壤深度的增加而减小. 优先流区和基质流区土壤全磷质量分数随着土壤深度的增加没有明显规律. 另外, 同一土壤深度土壤全磷质量分数在优先流区与基质流区不存在显著性差异.

盐地碱蓬根区的优先流区与基质流区土壤有效磷质量分数随土壤深度的变化见图 5-c. 优先流区和基质流区土壤有效磷质量分数随着土壤深度的增加逐渐减小. 优先流区在土壤深度为 0~5、>5~10 和 >10~15 cm 的土壤有效磷质量分数分别为 (10.02 ± 3.00) 、 (4.52 ± 0.60) 和 $(4.46 \pm 0.50) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 基质流区在

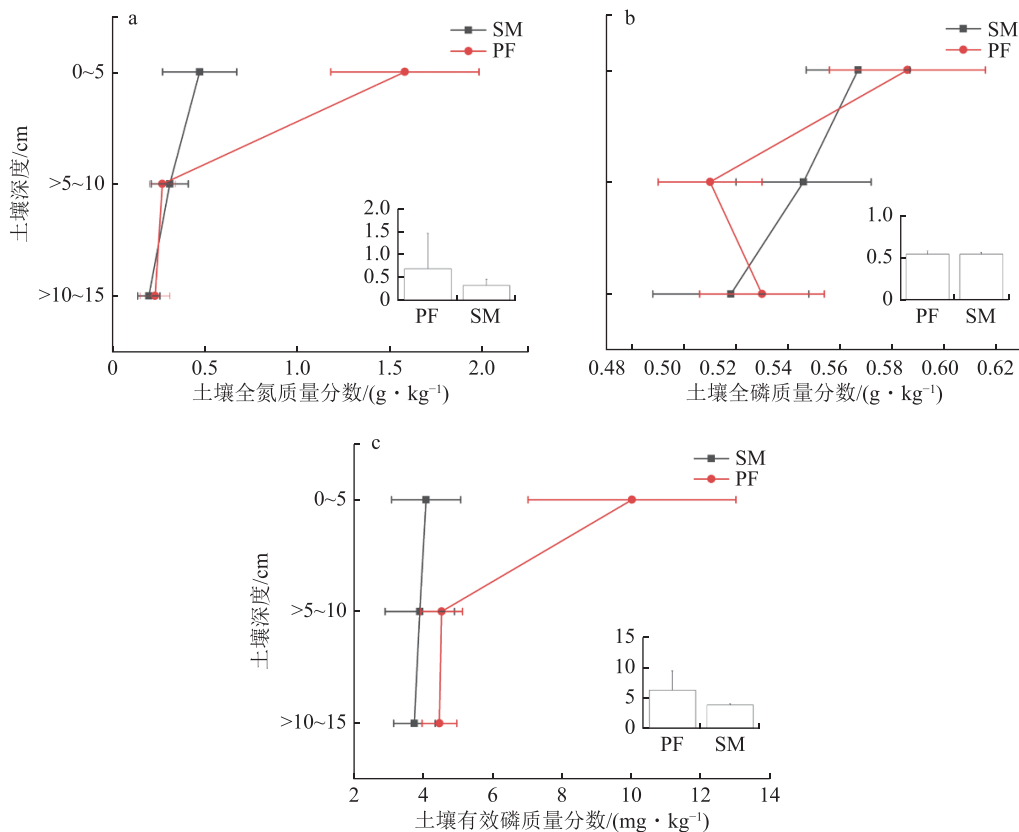


图 5 优先流区与基质流区土壤全氮 (a)、全磷 (b) 和有效磷 (c) 质量分数随土壤深度的变化

土壤深度为 0~5、>5~10 和 >10~15 cm 的土壤有效磷质量分数分别为 (4.08 ± 1.00) 、 (3.90 ± 1.00) 和 $(3.74 \pm 0.60) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。盐地碱蓬同一土壤深度有效磷质量分数在优先流区均显著高于基质流区。总体来看, 优先流区的有效磷质量分数是显著高于基质流区的。

4 讨论

4.1 土壤养分在优先流区和基质流区的变化 研究结果表明, 在土壤深度为 0~15 cm 时, 土壤有机碳、有机质、全氮和有效磷质量分数随着土壤深度的增加逐渐减小, 而不同土壤深度土壤全磷质量分数差异并不显著。这与前人相关的研究结果一致^[22-25]。当土壤深度为 0~5 cm 时, 有机碳、有机质、全氮和有效磷质量分数最大, 这是因为盐地碱蓬覆盖下的浅层土壤的有机质来源于地表枯落物的分解, 较高的土壤微生物活性促使植物枯落物分解作用加强。另外, 枯落物表聚性会保护土壤结构的完整性, 土壤表层植物根系质量分数增高, 根系分泌的有机物质, 促进了氮、磷等的释放。因此, 对于盐地碱蓬, 无论是优先流区还是基质流区, 均是土壤表层养分的质量分数较高。

与此同时, 还发现盐地碱蓬土壤有机碳、有机质、全氮和有效磷在优先流区的质量分数显著高于其在基质流区的质量分数, 而土壤全磷的质量分数在优先流区和基质流区是没有显著差异的。以上结果可能是由于在优先流区的根系较基质流区丰富, 优先流区的根系活性相对较强, 根系在生长过程中, 会向根区释放有机化合物, 从而影响根区土壤的养分质量分数。如根系分泌物有机酸会促进磷元素释放, 从而改变根区的土壤理化性质, 使优先流区的养分质量分数高于基质流区。另外, 土壤水流会携带腐殖质等重要的有机质在优先流区域运动扩散, 可能会被优先流路径的管壁滞留, 从而使优先流区的养分质量分数增加。

4.2 土壤水质量分数在优先流区和基质流区的变化

研究表明土壤水质量分数的变化趋势为随着土壤

深度的增加先减小后增加, 这可能是因为黄河三角洲湿地土壤深层含盐量较高, 导致根系主要吸收土壤表层以及土壤中层水分, 因此土壤中层以上水质量分数随着土壤深度的增加逐渐减小。另外, 黄河三角洲地下水位较浅, 导致土壤深层水质量分数较高。

研究结果也表明, 在土壤深度为 0~20 cm 时, 优先流区的水质量分数较基质流区的水质量分数高, 在土壤深度为 >20~60 cm 时, 基质流区的水质量分数高于优先流区, 但是差异很小。这可能是实验中对土壤施加染色液所造成的。优先流的存在会促使水分沿着优先流路径绕过基质流区流动, 快速穿透土壤层, 从而影响地下水的交换^[26]。在染色实验开始前, 2 区的初始水压力相同, 不存在水分的扩散, 当施加染色液后, 染色液沿着土壤的优先流路径快速流动, 导致水压力超过大孔隙进水压力, 基质流不起作用, 同时土壤表层根系最丰富, 细根系自身具有较强的吸水能力, 细根系不会直接与优先流区水分发生作用, 主要吸收土壤基质区微小孔隙内水分, 所以在土壤表层表现为优先流区水质量分数高于基质流区。然而随着优先流区湿润峰快速传播, 湿润峰主要通过土壤中层以及深层水质量分数或者孔隙水压力快速增加来体现, 由于优先流对孔隙水压力快速变化影响较大, 因此, 优先流区和基质流区会产生水压力差, 压力差导致 2 区之间水分扩散^[27], 水流从优先流区向基质流区扩散, 土壤表层以下 2 区之间扩散性明显, 但是 2 区之间水质量分数差异程度与扩散性没有必然联系, 并不是水分从优先流区向基质流区扩散量大, 基质流区水质量分数大于优先流区, 或者水分从优先流区向基质流区不扩散, 基质流区水质量分数小于优先流区水质量分数, 因为基质流区孔隙内可能存在不流动水体^[28], 所以, 导致土壤表层以下 2 区水质量分数空间异质性。

4.3 土壤理化性质间的相关关系 优先流区和基质流区土壤特性的相关关系如表 1 所示。结果表明, 在优先流区, 土壤有机碳和土壤有机质、全氮和有效

表 1 优先流区与基质流区的土壤特性相关关系

| 分区 | 土壤特性 | 有机碳 | 有机质 | 全氮 | 全磷 | 有效磷 |
|------|------|---------|--------|---------|-------|-----|
| 优先流区 | 有机碳 | 1 | | | | |
| | 有机质 | 1.000** | 1 | | | |
| | 全氮 | 0.999* | 0.999* | 1 | | |
| | 全磷 | 0.970 | 0.971 | 0.960 | 1 | |
| | 有效磷 | 1.000* | 1.000* | 1.000** | 0.965 | 1 |
| 基质流区 | 有机碳 | 1 | | | | |
| | 有机质 | 1.000** | 1 | | | |
| | 全氮 | 0.996 | 0.996 | 1 | | |
| | 全磷 | 0.996 | 0.996 | 0.983 | 1 | |
| | 有效磷 | 1.000* | 1.000* | 0.998* | 0.993 | 1 |

** 在 0.01 水平上显著相关; * 在 0.05 水平上显著相关。

磷均呈显著正相关,土壤有机质和土壤全氮、土壤有效磷也呈显著正相关,另外土壤全氮和土壤有效磷的关系也是显著正相关。在基质流区,土壤有机碳和有机质呈显著正相关关系,土壤有机碳和有机质均与土壤有效磷均呈显著正相关。综上,无论是优先流区和基质流区,土壤特性包括土壤有机碳、有机质、全氮、全磷和有效磷均呈现正相关关系,其中关系显著的为土壤有机碳和有机质与全氮和有效磷的相关关系。以上研究结果与以往研究结果一致,如李东等^[29]研究结果表明,土壤有机质质量分数与全氮质量分数呈极显著的正相关关系;路翔等^[23]研究证明,多种森林类型覆盖下土壤有机碳质量分数与全氮质量分数呈极显著正相关;张兴义等^[30]对农田浅层黑土碳氮磷质量分数空间异质性统计分析发现,土壤全碳与全氮、全磷,全氮与全磷均呈极显著正相关。

5 结论

本文主要对黄河三角洲湿地盐地碱蓬根区优先流区和基质流区土壤特性分布差异进行了分析和比较,并统计分析土壤理化性质的相关关系。主要结论如下:

1)盐地碱蓬根区土壤理化性质随着土壤深度的变化:土壤水质量分数随着土壤深度的增加呈现先减小后增加的趋势;土壤有机碳、有机质、全氮和有效磷质量分数随着土壤深度的增加呈现减小的趋势;土壤全磷质量分数随着土壤深度的增加,变化幅度较小,不同深度土壤全磷质量分数不存在显著性差异。

2)盐地碱蓬根区土壤理化性质在优先流区和基质流区的差异:土壤深度为 0~20 cm,优先流区土壤水质量分数高于基质流区,然而土壤深度为 >20~60 cm 时,基质流区的土壤水质量分数高于优先流区,但差异不显著;相同土壤深度,优先流区的土壤有机碳、有机质、全氮和有效磷质量分数均显著高于基质流区,然而优先流区和基质流区的土壤全磷质量分数不存在显著差异。

3)盐地碱蓬根区优先流区的土壤有机碳、有机质、全氮和有效磷呈显著正相关,基质流区土壤有机碳、有机质和有效磷显著正相关。

6 参考文献

- [1] 牛健植,余新晓,张志强. 优先流研究现状及发展趋势[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 231
- [2] BEVEN K, GERMANN P. Macropores and water flow in soils[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(5): 1311
- [3] DEKKER L W, RITSEMA C J. Preferential flow paths in a water repellent clay soil with grass cover[J]. *Water Resources Research*, 1996, 32(5): 1239
- [4] HENDRICKX J M H, FLURY M. Uniform and preferential flow mechanisms in the vadose zone. In conceptual models of flow and transport in the fractured Vadose Zone[M]. Washington, DC: National Research Council, National Academy Press, 2001: 149
- [5] 牛健植,余新晓,张志强. 贡嘎山暗针叶林生态系统土壤优先流研究初探[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(增刊 2): 246
- [6] 张英虎. 北京鹫峰地区林木根系和石砾对土壤优先流的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2014
- [7] ZHANG Y, ZHANG M, NIU J, et al. The preferential flow of soil: a widespread phenomenon in pedological perspectives[J]. *Eurasian Soil Science*, 2016, 49(6): 661
- [8] 张英虎,牛健植,汪西林,等. 土壤溶质优先迁移影响因素研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(3): 33
- [9] ZHANG Y, ZHANG M, NIU J, et al. Rock fragments and soil hydrological processes: significance and progress[J]. *Catena*, 2016, 147: 153
- [10] 程金花,张洪江,史玉虎. 三峡库区花岗岩林地土壤特性与“优先路径”的关系[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(1): 97
- [11] KUNG K J S, KLADIVKO E J, HELLING C S, et al. Quantifying the pore size spectrum of macropore-type preferential pathways under transient flow[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(4): 978
- [12] NOGUCHI S, NIK A R, KASRAN B, et al. Soil physical properties and preferential flowpaths in tropical rainforest, Bukit Tarek, Peninsular Malaysia[J]. *Journal of Forest Research*, 1997, 2(2): 115
- [13] DURST R, IMFELD G, LANGE J. Transport of pesticides and artificial tracers in vertical-flow lab-scale wetlands[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(1): 554
- [14] ELÇI A, MOLZ F J. Identification of lateral macropore flow in a forested riparian wetland through numerical simulation of a subsurface tracer experiment[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2009, 197(1/2/3/4): 149
- [15] MUÑOZ P, DRIZO A, CULLY H W. Flow patterns of dairy wastewater constructed wetlands in a cold climate[J]. *Water Research*, 2006, 40(17): 3209
- [16] BUNDT M, JAGGI M, BLASER P, et al. Carbon and nitrogen dynamics in preferential flow paths and matrix of a forest soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(5): 1529
- [17] 杜晓晴,牛健植,侯琨,等. 华北土石山区优先流区与基质流区土壤特性分析[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(3): 51

- [18] 田家怡, 王秀凤, 蔡学军, 等. 黄河三角洲湿地生态系统保护与恢复技术[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005.
- [19] 韩鹏, 吴耿, 吴勇泉, 等. 芦苇形态结构对黄河三角洲不同生境的响应[J]. 湿地科学, 2011, 9(2): 185
- [20] 崔保山, 李英华, 杨志峰. 基于管理目标的黄河三角洲湿地生态需水量[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 606
- [21] 贺强. 黄河口盐沼植物群落的上行、种间和下行控制因子[D]. 上海: 上海交通大学, 2012
- [22] ZIBILSKA L M, BRADFORD J M, SMART J R. Conservation tillage induced changes in organic carbon, total nitrogen and available phosphorus in a semi-arid alkaline subtropical soil[J]. Soil & Tillage Research, 2002, 66(2): 153
- [23] 路翔, 项文化, 刘聪. 中亚热带4种森林类型土壤有机碳氮贮量及分布特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 169
- [24] 肖石红, 高常军, 蔡坚, 等. 南亚热带杉木和红椎林及其混交林的土壤肥力[J]. 森林与环境学报, 2018, 38(2): 142
- [25] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 玉米秸秆混合还田深度对土壤有机质及养分含量的影响[J]. 土壤与作物, 2018, 7(2): 139
- [26] BARGUES-TOBELLA A, REESE H, ALMAW A, et al. The effect of trees on preferential flow and soil infiltrability in an agroforestry parkland in semiarid Burkina Faso[J]. Water Resources Research, 2014, 50(4): 3342
- [27] SHAO W, NI J, LEUNG A K, et al. Analysis of plant root-induced preferential flow and pore-water pressure variation by a dual-permeability model[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(11): 1537
- [28] JARVIS N J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality[J]. European Journal of Soil Science, 2007, 58(3): 523
- [29] 李东, 王子芳, 郑杰炳, 等. 紫色丘陵区不同土地利用方式下土壤有机质和全量氮磷钾含量状况[J]. 土壤通报, 2009, 40(2): 310
- [30] 张兴义, 隋跃宇, 张少良, 等. 薄层农田黑土全量碳及氮磷钾含量的空间异质性[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2): 1

Differences in soil characteristics between preferential and matrix flow areas in wetland plants root zone in the Yellow River Delta

WU Yanan¹⁾ ZHANG Yinghu²⁾ ZHANG Zhenming^{1)†} ZHANG Mingxiang^{1)†}

(1)The Key Laboratory of Ecological Protection in the Yellow River Basin of National Forestry and Grassland Administration, School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, 100083, Beijing, China;

2)School of Forestry, Nanjing Forestry University, 210037, Nanjing Jiangsu, China)

Abstract *Suaeda salsa*, a typical wetland plant in the Yellow River Delta National Nature Reserve, was studied. Field dye tracing and laboratory soil property monitoring were used to understand soil effect of preferential flow, providing practical guidance for wetland vegetation restoration. Contents of soil organic carbon, organic matter, total nitrogen and available phosphorus were found to decrease gradually with increasing soil depth, soil water content decreased initially and then increased with increasing soil depth. Any changes in soil total phosphorus content with increasing soil depth were found to be small. The contents of soil organic carbon, organic matter, total nitrogen and available phosphorus in preferential flow area were found significantly higher than in matrix flow area, but no significant difference in total phosphorus content was found between the two areas. Soil water content in preferential flow area was found to be higher than in matrix flow area at soil depth of 0-20 cm; soil water content in the matrix flow area was higher than in preferential flow area at soil depth of 20-60 cm, but all without statistical significance. Soil organic carbon, organic matter, total nitrogen and available phosphorus were found to be significantly positively correlated in preferential flow area. Soil organic carbon, organic matter, and available phosphorus were also found to be positively correlated significantly in the matrix flow area.

Keywords preferential flow; *Suaeda salsa*; soil; Yellow River Delta wetland