

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.01.002

太湖地区农田土壤大孔隙及胶体释放 对有效磷下渗的影响

李 勇^{1,2},袁佳慧²,张维维²,王 双²

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室,江苏 南京 210098;
2. 河海大学环境学院,江苏 南京 210098)

摘要: 为了进一步验证农田土壤中大孔隙流及农业活动引起的胶体释放对磷素下渗污染地下水的影
响,采用太湖地区农田土壤进行平行土柱试验。结果显示:模拟土壤胶体(质量浓度约为 50 mg/L)
释放情况时,土壤水流中胶体物质和有效磷的垂直迁移速度明显加快,土柱底部(100 cm 深度)出流中
有效磷的渗漏速率达到 0.15 kg/(m²·d),比自然状态增大约 15.4%;当土壤中存在约 5%(体积分
数)的大孔隙情况下,土柱底部的有效磷渗漏速率达到 29.9 kg/(m²·d),大孔隙引起的优势流对
胶体和有效磷的下渗起主导作用,而土壤胶体物质释放引起的辅助作用约占 3.2%。土壤胶体释
放对土壤 pH 和电导率等产生影响,进而影响溶质的运移转化过程。太湖地区农田土壤中广泛存
在大孔隙引起的优势流及农业耕作活动引起的土壤胶体释放,为有效磷垂直下渗提供了加速途径,
对地下水磷污染造成了较大的影响。

关键词: 农田土壤;土柱试验;土壤胶体;大孔隙流;有效磷;垂直迁移;太湖地区
中图分类号: X131.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2017)01-0007-07

Effects of macropore and colloid release on vertical migration of available phosphorus in farmland soil of Taihu Lake region

LI Yong^{1,2}, YUAN Jiahui², ZHANG Weiwei², WANG Shuang²

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education,
Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To investigate the effects of macropore flow in farmland soil and colloid release caused by agricultural ac-
tivities on the vertical migration of phosphorus and groundwater pollution, parallel soil column experiments were con-
ducted using agricultural soil from the Taihu Lake Basin. The results show that the release of colloid (with a con-
centration of about 50 mg/L) in soil accelerated the vertical migration of colloid and available phosphorus, and the
leaching rate of available phosphorus at the soil column bottom (100 cm in depth) reached 0.15 kg/(m²·d), about
15.4% higher than it was with no obvious release of soil colloid. Furthermore, the existence of macropores (5% in
volume) in soil significantly increased the leaching rate of available phosphorus, with a value of 29.9 kg/(m²·d)
at the soil column bottom. The preferential flow caused by macropores played a critical role in the leaching of
colloid and available phosphorus. However, the release of soil colloid accounted for 3.2% of the increase of the
leaching rate of available phosphorus when macropores existed. Soil colloid release altered the chemical charac-
teristics of soil, such as pH and electric conductivity, and then influenced the transport of solutes in soil. Preferential
flow caused by macropores and soil colloid release caused by agricultural activities exist across the agricultural area

of the Taihu Lake Basin. Macropores and soil colloid accelerated the vertical infiltration of phosphorus, which increased the risk of groundwater pollution caused by phosphorus.

Key words: farmland soil; soil column experiment; soil colloid; macropore flow; available phosphorus; vertical migration; Taihu Lake region

太湖流域是我国重要的农业种植区,日益增长的磷肥施入量导致该区域地表水的富营养化和地下水污染^[1]。研究发现太湖流域农业磷肥利用率为9.34%~14.76%,大量的磷素通过径流排出进入地表水体或淋失渗漏进入地下水^[2]。太湖流域农村地区的地下水中总磷年均含量(质量浓度)达到0.20~0.35 mg/L^[3]。叶玉适等^[4]通过田间定位试验对太湖流域的磷流失量进行研究,发现总磷渗漏淋失量为0.30 kg/hm²,30 cm深处渗漏水中总磷质量浓度为0.32 mg/L。由此可见,尽管磷素在土壤中易被土壤颗粒吸附而不易向下迁移^[5],土壤和地下水中磷污染现象依然严重,农田土壤表层的磷素容易通过大孔隙流及土壤胶体的辅助作用下渗入地下水^[6-7]。

农田土壤中广泛存在的大孔隙由植物根系、土壤动物活动和过度晒田等因素形成,对土壤中水分和养分下渗迁移产生重大的影响^[8-9]。吴华山等^[10]通过染色法测定太湖地区农田土壤中的大孔隙,发现表层土壤(0~20 cm)大孔隙体积占3.5%~8.5%。王晓星^[11]通过原状土柱研究发现大孔隙的出流量占总排水量的27.5%,而其携带溶质通量占到总量的86.9%。章明奎等^[12]通过染色法研究大孔隙优势流路径,发现大孔隙流能够到达的深度远高于基质流,最深达110 cm,大孔隙流周围土壤的磷浓度明显高于其余土壤基质。农田土壤中大孔隙引起的优势流是养分下渗流失的重要输运载体。

农业耕作活动(包括翻耕、灌溉、施肥等)和降雨等引起的土壤胶体释放对溶质运移的辅助作用也已被证实是土壤中磷素下渗迁移的重要原因^[13]。施用不同肥料可能引起土壤胶体不同程度地加速释放,Zang等^[14]研究发现施用有机肥比施用无机肥后土壤中胶体磷运移量增大了25%。Makris等^[15]通过人为添加水散性胶体的土柱试验,发现施肥土柱较未经施肥土柱的滤液中更早监测出胶体磷,并测得淋滤液胶体初始浓度为投加浓度的30%。同时土壤内部环境的变化也产生不同的胶体释放。Henderson等^[16]研究认为Fe²⁺作为胶结剂结合土壤中的含磷胶体并在还原条件下释放,在厌氧环境下的土壤中胶态磷释放量更大。胡俊栋等^[17]发现胶体的辅助迁移作用主要受化学性质的影响,如pH值升高或降低均会刺激土壤中胶体的释放,而土壤电导率与土壤胶体磷流失有负相关性,电导率高的土壤中胶体磷的流失受到抑制。由土壤胶体携带的磷在土壤中的迁移速度相对无胶体结合的磷酸根离子更大^[18],土壤胶体对磷的吸附作用大于土壤颗粒^[19],土壤胶体携带的磷在土壤中的迁移速度比磷酸根自身的迁移速度更快,移动性更强^[16,20]且迁移距离更远^[21]。由此可见,农田土壤中磷素的垂直下渗主要受到大孔隙和土壤胶体辅助携带的影响,通过这2种作用加速了磷的下渗迁移。

为进一步揭示太湖地区农田土壤及地下水中磷素的来源和农业耕作活动对其垂直下渗的影响,笔者采用太湖地区农田土壤进行土柱平行试验,研究分析了土壤中大孔隙和胶体对其水分及磷素垂直下渗速率和通量的影响,旨在为太湖地区地下水环境综合治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置由土柱、供水水箱和监测系统构成。两根土柱规格相同,柱高100 cm,内径30 cm。通过进水阀控制从土柱顶端进水,土柱底部设有出水口。其中1号柱用于模拟自然情况(无大孔隙流);2号柱通过人为构造大孔隙来模拟优势流情况,采用投加石英砂的方式,石英砂约占土壤体积的5%。土柱中所填充的土壤采自江苏省镇江市丹阳农田,土壤颗粒组成以粉粒(51.82%)为主,砂粒和黏粒质量分数分别是40.20%和7.98%,土壤有机质质量比为19.60 g/kg,总磷和有效磷质量比分别为0.80 g/kg和25.52 mg/kg,土壤胶体质量比为322.78 g/kg。土壤经风干、粉碎后分层装入2根土柱,装填时每10 cm压实1次,2根柱子填充土壤的方式和土壤总质量相同。填充后土壤密度为1.39 g/cm³。尽管土壤经分层装填后破坏了原有结构,但理化性质在垂直方向上的变化趋势与原土壤相似,能很好地反映胶体和磷在土壤中的垂直迁移情况。

1.2 试验方案

试验开始前先用自来水缓慢淋洗土柱约1个月,待出水流量和监测指标稳定后开始试验。1号柱和

2 号柱在相同水流条件下(前 30 d 供水并保持土柱上层 5 cm 积水;后 30 d 停止供水,使水流落干下渗)同步进行试验,依次进行不人为投加胶体(工况 1)和人为投加胶体(工况 2)的试验。

工况 1 测定分析有效磷(进水质量浓度为 101.2 mg/L)随水流垂直下渗的过程;工况 2 在供水箱中拌入有效磷(进水质量浓度为 101.2 mg/L)的同时投加一定量的土壤胶体(质量浓度为 50.7 mg/L)并搅拌均匀,测定分析土柱底端出水中胶体含量和有效磷浓度的变化规律。工况 1 试验完成后对土柱进行缓慢淋洗,待各项指标稳定后开始进行工况 2 的试验。试验中所投加的土壤胶体为从剩余土壤中所提取。

1.3 监测和分析方法

1.3.1 监测点位及分析指标

下渗水流量在土柱底部出水端测定,在试验第一阶段(即积水下渗阶段)水流恒定,下渗流量稳定,每 12 h 测定 1 次;在试验第二阶段(即落干下渗阶段)底端出水流量逐渐减小,第 1 天每 2 h 测定 1 次,随后每 24 h 测定 1 次。底部出水中胶体浓度和有效磷浓度与水量同步测定。在距土柱顶部 40 cm 和 70 cm 处设置观测点,用来监测土柱中的 pH 及电导率变化。

1.3.2 分析方法

土壤基本理化性质:密度采用环刀法测定,含水量采用烘干法测定,有机质用水合热重铬酸钾氧化-比色法,总磷含量采用碱熔-钼锑抗分光光度法,颗粒粒径用 Mastersizer 2000 激光粒度仪测定,试验的溶液中有有效磷的测定采用钼锑抗比色法。有效磷垂直迁移通量根据检测出的有效磷浓度与相应出水量的乘积得到。

土壤胶体含量测定参照森林土壤黏粒的提取(GB 7872—87《森林土壤黏粒的提取》);渗流中土壤胶体质量浓度的分析方法:首先用从剩余土壤中提取的胶体配制一系列浓度梯度(5、10、15、20、25、30、35 和 40 mg /L)的胶体悬液,用分光光度计在 600 nm 波长下测定其吸光度。拟合胶体浓度与吸光度间的曲线方程,并根据待测土壤胶体的吸光度从已知拟合曲线中得到相应的胶体质量浓度。

2 结果与讨论

2.1 土柱中水流特性

积水下渗阶段 2 根土柱出水量稳定(图 1(a)),1 号柱平均出水量为 149.2 mL/d,相应的平均渗流速度为 1.2 m/d;在落干下渗阶段,出水流量逐渐减少,至第 60 天仍有少量水流渗出(约 6.0 mL/d)。2 号柱在积水下渗阶段平均出水流量为 20 702.5 mL/d(图 1(b)),相应的平均渗流速度为 168.7 m/d;在落干下渗阶段出水流量迅速减少,至第 33 天约为 154.8 mL/d,随后呈逐渐降低趋势,至第 60 天基本无水流渗出。2 号柱中大孔隙通道大幅度减小了土柱其他部分土壤中水流的渗出路径,在落干阶段的前期渗出速率仍然远远大于 1 号柱,也因此比 1 号柱更快达到落干状态。大孔隙改变了水流原有的流电路径,水流沿着连通的大孔隙快速流过,与土壤基质接触的面积小、时间短,以较快的渗流速度到达土壤深层^[22]。

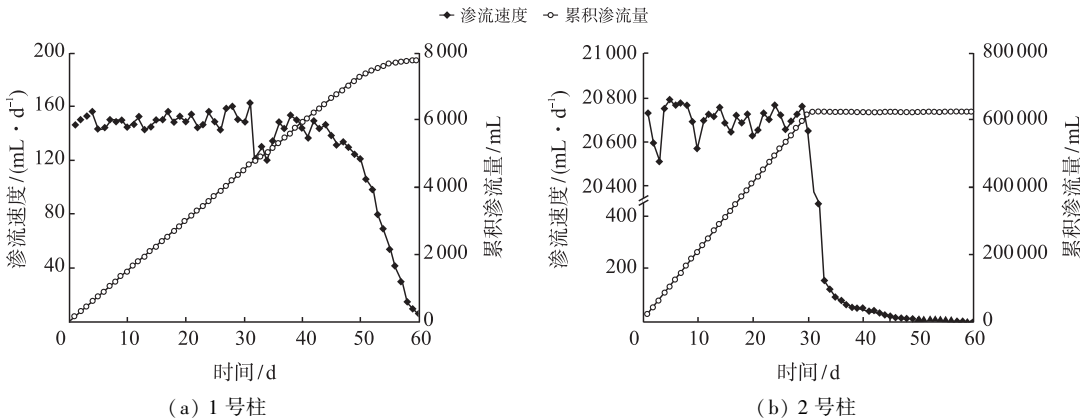


图 1 土柱底部出水流量变化及累积渗流量
Fig. 1 Changes of percolation flux and cumulative percolation flux at bottom of soil column

2.2 土柱底部出水胶体浓度变化

1 号柱(无大孔隙)在自然状态(未添加胶体)下土壤自身含有的胶体有少部分释放出来,底部出水中胶体质量浓度逐渐增大到 11.5 mg/L(图 2(a));添加胶体情况下底部出水中胶体浓度从 20 mg/L 最终增大到

70 mg/L,超过了进水胶体质量浓度(50.7 mg/L)约40%。这可能是由于加入胶体后土壤化学性质发生改变导致土壤自身胶体部分释放到土壤溶液中随水流流出土柱^[23]。2号柱(有大孔隙)在自然状态下底部出水中胶体质量浓度缓慢增长,后期增速较缓,总体增长量为3.8 mg/L(图2(b));添加胶体后底部出水中胶体质量浓度从50 mg/L增大到60 mg/L。大孔隙流导致水流及胶体快速迁移,与土壤接触面小,土壤胶体释放量相对较少。试验结果显示,在供水过程中土壤胶体发生了释放,在一定程度上增大了底部出水的胶体质量浓度。试验前土壤中胶体质量比为322.8 g/kg,这部分胶体可能随着供水和增加胶体的影响而发生释放。已有研究报道^[23],在农田灌溉或强降雨的初期导致的显著干湿交替会引起土壤胶体的释放,释放量为30~120 mg/m³。

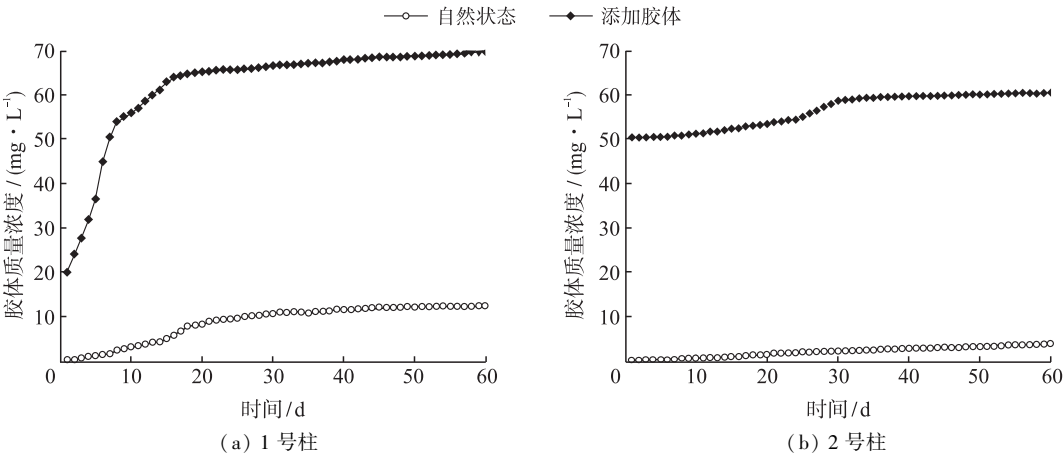


图2 土柱底部出水中胶体浓度变化
Fig. 2 Change of soil colloid concentration in percolate at bottom of soil column

2.3 底部出水中有效磷浓度变化

1号柱(无大孔隙)在自然状态(即不添加胶体)下,积水下渗阶段土柱底部有效磷浓度在开始时增长缓慢,在第22天时出水有效磷浓度接近进水有效磷浓度并趋于稳定;落干下渗阶段有效磷浓度基本保持不变(图3(a))。而当在供水中添加胶体(质量浓度50.7 mg/L)后土柱底部出水中有效磷浓度有所升高,并在第18天左右趋于稳定。这些差异说明土壤胶体对于有效磷的迁移起到一定的促进作用^[24],土壤胶体吸附携带的磷加速了磷的下渗。实际中,农田磷肥的过量施用,特别在水溶剂多、电解质浓度低的条件下,会导致固相中部分磷素以胶体磷的形式迁移,而胶体磷的渗滤速度更快,造成磷的过量淋失^[21]。

2号柱(有大孔隙)在自然状态和添加胶体条件下,底部出流中有效磷浓度变化规律相似,出水质量浓度升高较快并达到稳定(95.2 mg/L),接近进水质量浓度(101.2 mg/L)(图3(b))。但在积水下渗的前期阶段(0~9 d),与自然状态相比,添加土壤胶体对磷运移的促进作用仍然较明显。2号柱在胶体和大孔隙流的共同作用下有效磷下渗迁移速度更快,并且大孔隙导致的优势流在有效磷迁移的过程中起了主导作用,而胶体的促进作用相对较小。

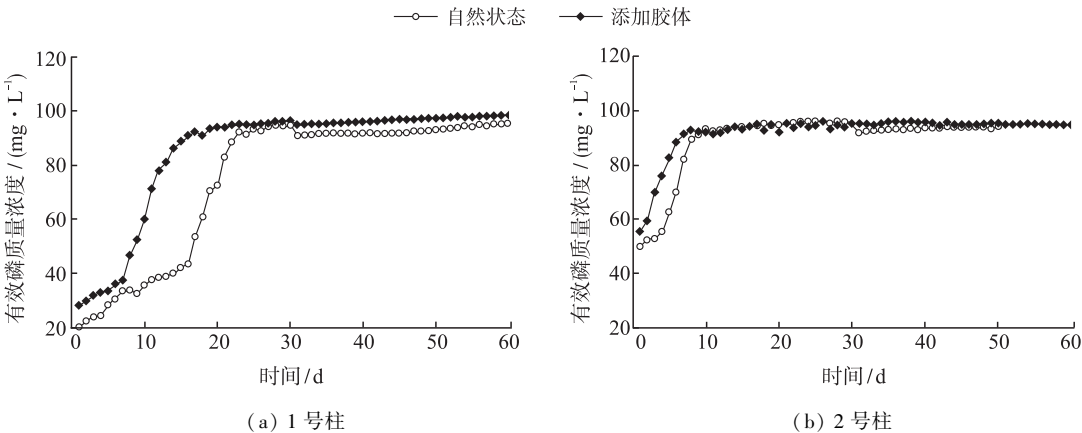


图3 土柱底部出水中有效磷浓度变化
Fig. 3 Change of available phosphorus concentration in percolate at bottom of soil column

土壤中胶体的释放同时受到水流运动、土壤化学性质等因素的影响,在水流条件发生改变或下渗过程中,土壤中的胶体物质会逐渐释放并进入水体^[25]。同样地,土壤胶体的释放也会在一定程度上改变土壤的化学性质,进而影响土壤中溶质的运移转化过程^[26]。试验过程中 1 号柱添加胶体情况下土壤 pH 在连续积水阶段降幅为 1.2,而自然状态下的降幅为 0.5,在停止供水后逐渐恢复到初始值(图 4)。pH 降低导致胶体表面电位值减小,颗粒间的排斥作用减弱,胶体的絮凝能力增强,进而导致胶体颗粒粒径的增大及其过量释放^[27]。而 2 号柱由于大孔隙的存在,水流与土壤基质接触时间少,反应时间短,添加胶体后土壤 pH 变幅较 1 号柱小。土壤电导率同样可表征胶体的释放程度(图 5),胶体可与磷酸根离子发生专性吸附反应,释放出大量 H⁺,继而导致其他盐基离子大量释放,表现出电导率增大^[28]。胶体的过量释放导致其吸附并携带更多的有效磷向下迁移。

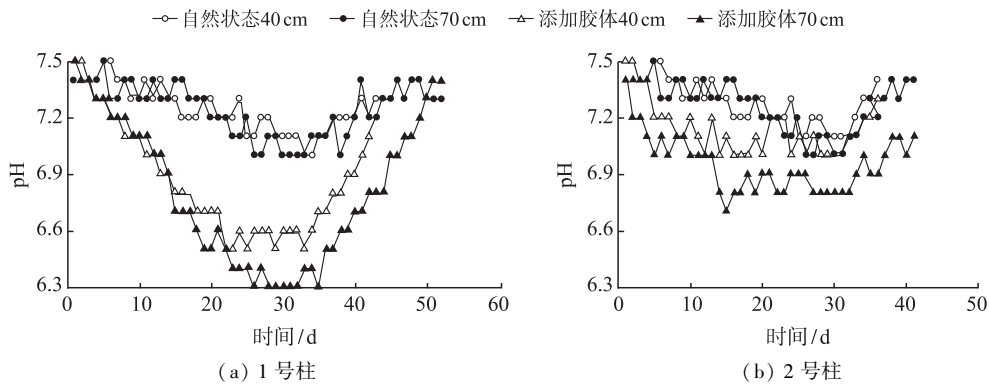


图 4 土柱中 pH 变化
Fig. 4 Change of pH value in soil column

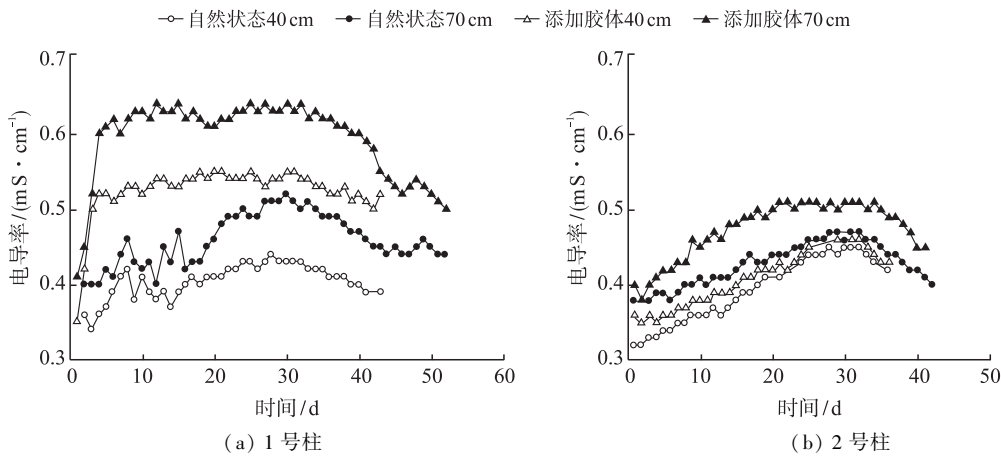


图 5 土柱中电导率变化
Fig. 5 Change of electric conductivity in soil column

2.4 胶体对有效磷垂直迁移通量的影响

1 号柱(无大孔隙)在积水下渗阶段,底部出流中有效磷通量在添加胶体情况下明显高于自然状态下的有效磷通量,并且增速更大,在第 30 天其通量接近 15 mg/d,平均渗漏速率为 11.0 mg/d;而在落干下渗阶段,自然状态和添加胶体工况下底部出流中胶体通量基本相近,最终都接近 0.8 mg/d,添加胶体工况下底部出流中胶体平均渗漏速率为 10.5 mg/d(图 6(a))。试验初期部分有效磷被土壤吸附固定,向下迁移量减少,吸附饱和后继续向深层迁移^[29],后期随着溶液逐渐排出土柱,流量减少,日通量逐渐降低到 0 mg/d。试验期间(60 d)1 号柱添加胶体后有效磷的平均流失速率为 0.15 kg/(m²·d),高于自然状态下的有效磷平均流失速率(0.13 kg/(m²·d)),增长 15.4%。说明胶体对供试土壤中有有效磷的垂直迁移有一定的辅助促进作用,添加胶体对有效磷的下渗速率及累积通量都产生了明显影响。

2 号柱添加胶体对其有效磷日通量的影响仅在试验前期表现较明显(图 6(b)),自然状态及添加胶体工况下有效磷平均渗漏速率分别为 29.92 kg/(m²·d)和 30.88 kg/(m²·d),添加胶体的作用使之增大了约

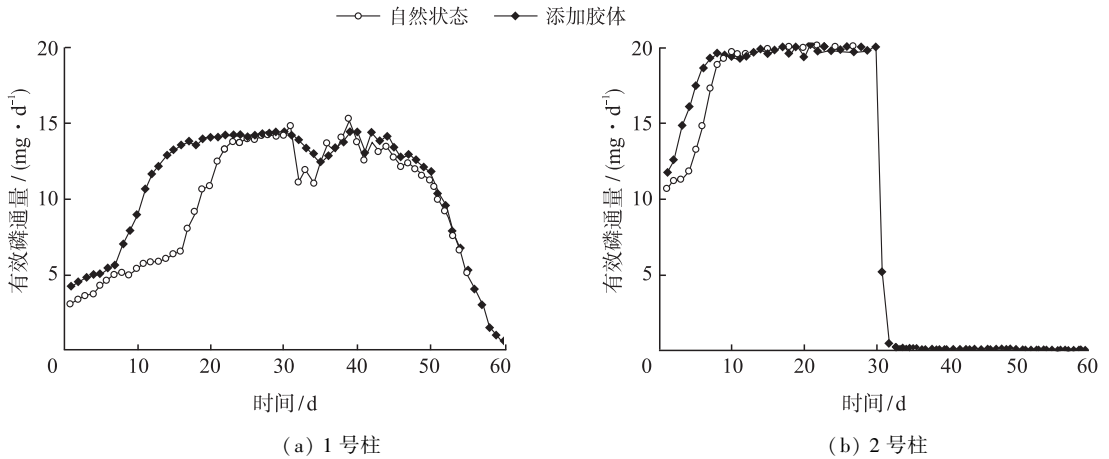


图6 土柱底部出水中有效磷通量变化
Fig.6 Distributions of available phosphorus flux at bottom of soil column

3.2%。对比1号柱、2号柱的有效磷累积通量,结果表明大孔隙流的存在导致有效磷垂直迁移量剧增,土壤大孔隙流引起的有效磷下渗迁移通量远大于胶体的携带辅助作用。

根据1号柱和2号柱水流及出流中有效磷分布特征(图1和图3),土壤中水流通量仍然是农田表层土壤中有效磷下渗运移的重要载体,部分大孔隙引起的优势流主导了土壤水流特征和有效磷的流失;当水流条件相同并无大孔隙存在时,农业活动等引起的土壤胶体释放对有效磷等溶质下渗迁移的促进作用相对更加明显。

3 结 论

农田土壤中胶体释放和大孔隙流在实际中广泛存在且受到农业耕作活动的影响,对有效磷等养分下渗产生重要影响。同等水流条件下,模拟土壤胶体释放(质量浓度约50 mg/L)明显增大了有效磷的垂直下渗速率,达到0.15 kg/(m² · d),较自然状态增加了15.4%。同时,大孔隙(5%,体积分数)引起的优势流对下渗水流和溶质具有明显的影响,所引起有效磷下渗通量达到20.9 kg/(m² · d),远大于胶体的促进作用(约3.2%),此时起决定作用的优势流加速了有效磷随水流的下渗。试验研究表明,太湖地区农田中施用的磷素通过垂直下渗污染浅层地下水的途径是存在的。

太湖地区农业种植面积大,磷肥大多以基肥形式深施土壤,耕作活动(如翻地、平地、种植、灌溉等)容易引起土壤物理化学性质的改变,进而引起土壤胶体的释放并携带磷素随水流下渗。由于大孔隙流在土壤有效磷垂直迁移中的主导作用,对于大孔隙较多的区域,宜采取合适的深耕方式,如捣碎表层土壤、破坏连通的大孔隙,从而避免大孔隙流引起的水分和养分流失。

参考文献:

[1] 闫丽珍,石敏俊,王磊.太湖流域农业面源污染及控制研究进展[J].中国人口·资源与环境,2010,20(1):99-107. (YAN Lizhen,SHI Minjun,WANG Lei. Review of agricultural non-point pollution in Taihu Lake and Taihu Basin[J]. China Population Resources and Environment,2010,20(1):99-107. (in Chinese))

[2] 王春梅.太湖流域典型菜地地表径流氮磷流失研究[D].南京:南京农业大学,2011.

[3] 沃飞,陈效民,吴华山,等.太湖流域典型地区农村水环境氮、磷污染状况的研究[J].农业环境科学学报,2007,26(3):819-825. (WO Fei,CHEN Xiaomin,WU Huashan,et al. pollution situation of nitrogen and phosphorus in rural water environment in typical region of Tai Lake[J]. Journal of Agro-Environment Science,2007,26(3):819-825. (in Chinese))

[4] 叶玉适,梁新强,李亮,等.不同水肥管理对太湖流域稻田磷素径流和渗漏损失的影响[J].环境科学学报,2015,35(4):1125-1135. (YE Yushi,LIANG Xinqiang,LI Liang,et al. Effects of different water and nitrogen managements on phosphorus loss via runoff and leaching from paddy fields in Taihu Lake basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2015,35(4):1125-1135. (in Chinese))

[5] ZHANG Yueqiang,WEN Mingxia,LI Xueping,et al. Long-term fertilisation causes excess supply and loss of phosphorus in purple paddy soil[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture,2013,94(6):1175-1183.

[6] 盛丰,张仁铎,刘会海.土壤优先流运动的活动流场模型模拟和敏感性分析[J].农业工程学报,2011,27(4):72-80.

- (SHENG Feng,ZHANG Renduo,LIU Huihai, Modeling preferential flow in unsaturated soil using active region model and its sensitivity analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2011,27(4):72-80. (in Chinese))
- [7] 吴继强. 非饱和土壤中孔隙流及溶质优先迁移基本特性试验研究[D]. 西安:西安理工大学,2010.
- [8] ROUSSEAU M,PIETRO L D,ANGULO-JARAMILLO R,et al. Preferential transport of soil colloidal particles[J]. Vadose Zone Journal,2004,3(1):247-261.
- [9] TÄUMER K,STOFFREGEN H,WESSOLEK G. Seasonal dynamics of preferential flow in a water repellent soil[J]. Vadose Zone Journal,2006,5(1):405-411.
- [10] 吴华山,陈效民,陈桢. 利用CT扫描技术对太湖地区主要水稻土中大孔隙的研究[J]. 水土保持学报,2007,21(2):175-178. (WU Huashan,CHEN Xiaomin,CHEN Can. Study on macropore in main paddy soils in Tai-Lake Region with CT[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2007,21(2):175-178. (in Chinese))
- [11] 王晓星. 土壤大孔隙特征以及对土壤中溶质迁移影响的研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2013.
- [12] 章明奎,王丽平. 旱耕地土壤磷垂直迁移机理的研究[J]. 农业环境科学学报,2007,26(1):282-285. (ZHANG Mingkui,WANG Liping. Study on mechanisms of phosphorus downward transfer in arable soils[J]. Journal of Agro-Environment Science,2007,26(1):282-285. (in Chinese))
- [13] VANDEVOORT A R,LIVI K J,ARAI Y. Reaction conditions control soil colloid facilitated phosphorus release in agricultural ultisols[J]. Geoderma,2013,206(9):101-111.
- [14] ZANG Ling,TIAN Guangming,LIANG Xinqiang,et al. Effect of water-dispersible colloids in manure on the transport of dissolved and colloidal phosphorus through soil column[J]. African Journal of Agricultural Research,2011,6(6):6369-6376.
- [15] MAKRIK K C,GROVE J H,MATOCCHA C J. Colloid-mediated vertical phosphorus transport in a waste-amended soil[J]. Geoderma,2006,136(1/2):174-183.
- [16] HENDERSON R,KABENGI N,MANTRIPRAGADA N,et al. Anoxia-induced release of colloid- and nanoparticle-bound phosphorus in grassland soils[J]. Environmental Science & Technology,2012,46(21):11727-11734.
- [17] 胡俊栋,沈亚婷,王学军. 离子强度、pH对土壤胶体释放、分配沉积行为的影响[J]. 生态环境学报,2009,18(2):629-637. (HU Jundong,SHEN Yating,WANG Xuejun. The effect of ionic strength and pH conditions on the release,deposition and dispersibility behaviors of natural soil colloid[J]. Ecology and Environmnet,2009,18(2):629-637. (in Chinese))
- [18] YU Congrong,GAO Bin,MUNOZ-CARPENA R,et al. A laboratory study of colloid and solute transport in surface runoff on saturated soil[J]. Journal of Hydrology,2011,402(1):159-164.
- [19] 刘瑾. 农田土壤水分散性胶体磷的赋存形态、活化机制及阻控技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
- [20] KLITZKE S,LANG F,KAUPENJOHANN M. Increasing pH releases colloidal lead in a highly contaminated forest soil[J]. European Journal of Soil Science,2008,59(2):265-273.
- [21] SIEMENS J,ILG K,PAGEL H,et al. Is colloid-facilitated phosphorus leaching triggered by phosphorus accumulation in sandy soils? [J]. Journal of Environmental Quality,2008,37(6):2100-2107.
- [22] 彭海英,李小雁,崔步礼,等. 土壤优势流研究方法综述[J]. 干旱气象,2011,29(2):137-143. (PENG Haiying,LI Xiaoyan,CUI Buli,et al. Review on the study of preferential flow in soil[J]. Journal of Arid Meteorology,2011,29(2):137-143. (in Chinese))
- [23] 商书波. 降雨对土壤胶体释放与迁移的影响研究[J]. 水土保持学报,2009,23(6):199-202. (SHANG Shubo. Study on the release and migration of soil colloids with rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2009,23(6):199-202. (in Chinese))
- [24] ILG K,DOMINIK P,KAUPENJOHANN M,et al. Phosphorus-induced mobilization of colloids: model systems and soils[J]. European Journal of Soil Science,2008,59(2):233-246.
- [25] SEN T K,KHILAR K C. Review on subsurface colloids and colloid-associated contaminant transport in saturated porous media [J]. Advances in Colloid and Interface Science,2006,119(2):71-96.
- [26] GEELHOED J S,HIEMSTRA T,VAN RIEMSDIJK W H. Phosphate and sulfate adsorption on goethite: single anion and competitive adsorption[J]. Geochimica et Cosmochimica acta,1997,61(12):2389-2396.
- [27] 孙慧敏,殷宪强,王益权. pH对黏土矿物胶体在饱和和多孔介质中运移的影响[J]. 环境科学学报,2012,32(2):419-424. (SUN Huimin,YIN Xianqiang,WANG Yiquan. The effect of pH on the transport of clay mineral colloid in saturated porous media [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2012,32(2):419-424. (in Chinese))
- [28] HENS M,MERCKX R. Functional characterization of colloidal phosphorus species in the soil solution of sandy soils[J]. Environmental Science & Technology,2001,35(3):493-500.
- [29] 沃飞,陈效民,方堃,等. 太湖地区两种典型水稻土中氮、磷迁移转化的研究[J]. 土壤通报,2007,38(6):1058-1063. (WO Fei,CHEN Xiaomin,FANG Kun,et al. Transference and transformation of nitrogen and phosphorus in two typical paddy soils in Tai-Lake region[J]. Chinese Journal of Soil Science,2007,38(6):1058-1063. (in Chinese))