中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

洪泽湖地区麦稻两熟农田及杨树林地降雨径流对地下水水质的影响

李吉平，徐勇峰，陈子鹏，李威，李萍萍，韩建刚

引用本文:
李吉平, 徐勇峰, 陈子鹏, 等. 洪泽湖地区麦稻两熟农田及杨树林地降雨径流对地下水水质的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 1097–1104.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.181049

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

科技部“十三五”农业面源和重金属污染农田综合防治与修复技术研发重点专项“农田氮磷淋溶损失污染与防控机制研究”项目正式启动

中国生态农业学报. 2016, 24(11): 1575–1576 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160892

再生水灌溉区农田包气带及地下水中硝酸盐分布特征及来源研究

Distribution characteristics and sources of nitrate in the unsaturated zone and groundwater of farmlands in an area irrigated with reclaimed water

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(11): 1725–1731 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190578

基于GIS的福建农田氮磷地表径流流失与污染风险评估

GIS–based pollution risk assessment of nitrogen and phosphorus loss in surface runoff in farmlands in Fujian Province

中国生态农业学报. 2018, 26(12): 1887–1897 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180118

基于稳定同位素和贝叶斯模型的引黄灌区地下水硝酸盐污染源解析

Source identification of nitrate contamination of groundwater in Yellow River Irrigation Districts using stable isotopes and Bayesian model

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(3): 484–493 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180887

华北农区浅层地下水硝酸盐分布特征及其空间差异性

Spatial distribution characteristics of nitrate in shallow groundwater of the agricultural area of the North China Plain

中国生态农业学报. 2018, 26(10): 1476–1482 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180639

中国生态农业学报(中英文) 2019 年 7 月 第 27 卷 第 7 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jul. 2019, 27(7): 1097−1104

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.181049

李吉平, 徐勇峰, 陈子鹏, 李威, 李萍萍, 韩建刚. 洪泽湖地区麦稻两熟农田及杨树林地降雨径流对地下水水质的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 1097−1104

LI J P, XU Y F, CHEN Z P, LI W, LI P P, HAN J G. Effects of rainfall and runoff on the groundwater quality in farmland and poplar forestland in the area of Hung-tse Lake[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(7): 1097−1104

洪泽湖地区麦稻两熟农田及杨树林地降雨径流对地下水水质的影响*

李吉平[1], 徐勇峰[1], 陈子鹏[1], 李 威[1,2], 李萍萍[1,2,3], 韩建刚[1,2,3**]

(1. 南京林业大学生物与环境学院 南京 210037; 2. 南京林业大学江苏省南方现代林业协同创新中心 南京 210037; 3. 江苏洪泽湖湿地生态系统国家定位观测研究站 洪泽 223100)

摘 要: 农业氮磷养分流失已经成为地下水污染的重要原因之一, 为了探究和比较麦稻两熟农田和杨树林地氮磷流失对地下水的影响, 本文在洪泽湖河湖交汇区设置农田和杨树林监测小区和监测井, 进行了为期 1 年的地表养分流失和地下水水质监测。结果表明: 1)林地雨前雨后表层土壤含水量均小于麦田, 麦田土壤含水量较雨前平均提高 8.95%, 林地提高 4.05%。2)麦田和杨树林地表层土壤硝态氮、铵态氮及有效磷流失总量分别为 63.53 mg·kg^{-1}、5.61 mg·kg^{-1} 及 57.43 mg·kg^{-1} 和 16.78 mg·kg^{-1}、2.45 mg·kg^{-1} 及 0.73 mg·kg^{-1}, 稻季田面水硝态氮、铵态氮、可溶性磷和颗粒态磷流失总量为 8.32 mg·L^{-1}、27.44 mg·L^{-1}、2.39 mg·L^{-1} 和 2.99 mg·L^{-1}, 监测期内杨树林氮磷流失总量明显低于农田。3)农田表层养分流失量与降雨量存在密切关系, 基本随降雨量增大呈对数增长, 而杨树林几乎不受降雨影响。4)农田产生径流的理论最小降雨量(麦田: 3.3 mm; 稻田: 4.2 mm)远小于杨树林地(22.8 mm), 麦田铵态氮、正磷酸盐浓度, 稻田和杨树林地总氮、硝态氮、铵态氮、总磷、可溶性磷、正磷酸盐浓度与降雨量存在显著相关性。5)农田径流中养分浓度与地下水氮磷含量存在显著相关性(P<0.05), 而杨树林地地下水氮磷含量保持在相对稳定水平, 与径流中养分浓度无明显相关性。与农田相比, 林地能够更好地控制径流养分流失, 缓解地下水污染, 有利于农业面源污染的控制。

关键词: 地表径流; 农田; 林地; 氮磷流失; 地下水污染; 面源污染

中图分类号: X523; S714

文章编号: 2096-6237(2019)07-1097-08 **放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Effects of rainfall and runoff on the groundwater quality in farmland and poplar forestland in the area of Hung-tse Lake*

LI Jiping[1], XU Yongfeng[1], CHEN Zipeng[1], LI Wei[1,2], LI Pingping[1,2,3], HAN Jiangang[1,2,3**]

(1. College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China of Jiangsu Province, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. National Positioning Observation Station of Hung-tse Lake Wetland Ecosystem in Jiangsu Province, Hongze 223100, China)

* 国家林业科学技术推广项目([2016]37 号)和江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)资助

** 通信作者: 韩建刚, 主要研究方向为农业面源污染和环境毒理。E-mail: hanjiangang76@126.com
李吉平, 主要研究方向为农业面源污染。E-mail: njfuljp@qq.com

收稿日期: 2018-12-04 接受日期: 2019-03-12

* The study was supported by the Extension Project of the State Forestry Science and Technology Department of China ([2016]37) and the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions.

** Corresponding author, E-mail: hanjiangang76@126.com

Received Dec. 4, 2018; accepted Mar. 12, 2019

Abstract: The loss of nitrogen and phosphorus in agriculture has become an important cause of groundwater pollution. To explore and compare the losses of nitrogen and phosphorus from runoff in wheat fields, rice fields, and poplar forestland, the surface nutrient losses and groundwater quality were monitored in the area of Hung-tse Lake for one year, by setting up monitoring plots and monitoring wells on farmland and poplar forestland. The main results were as follows: 1) the surface soil water content before and after precipitation in the forestland was lower than that in the wheat field. The average soil water content in wheat fields was 8.95% higher than that before rain, whereas it was 4.05% higher than that before rain in forestland. 2) The total loss of nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, and available phosphorus in the surface soil of the wheat field were 63.53 $mg·kg^{-1}$, 5.61 $mg·kg^{-1}$, and 57.43 $mg·kg^{-1}$; while those in the poplar forestland were 16.78 $mg·kg^{-1}$, 2.45 $mg·kg^{-1}$, and 0.73 $mg·kg^{-1}$, respectively. The total loss of nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, soluble phosphorus, and particulate phosphorus in the surface water of the rice field was 8.32 $mg·L^{-1}$, 27.44 $mg·L^{-1}$, 2.39 $mg·L^{-1}$, and 2.99 $mg·L^{-1}$, and the total loss of nitrogen and phosphorus in the poplar forestland was significantly lower than that in the farmland during the monitoring period. 3) There was a close relationship between the soil nutrient loss and rainfall in farmland. The soil nutrient loss in farmland increased logarithmically with an increase in rainfall. However, the loss of surface nutrients in the poplar forestland was almost unaffected by rainfall. 4) The theoretical minimum rainfall generating runoff in farmlands (wheat field: 3.3 mm; rice field: 4.2 mm) was much lower than that of the poplar forestland (22.8 mm). The concentration of ammonium nitrogen, orthophosphate, total nitrogen, nitrate nitrogen, total phosphorus, and soluble phosphorus were significantly correlated with rainfall in wheat field. 5) There was a significant correlation between the nutrient concentrations in farmland runoff and nitrogen and phosphorus contents in groundwater ($P < 0.05$). The nitrogen and phosphorus contents in the groundwater of poplar forestland, which had no significant correlations with the nutrient concentrations in the runoff, remained at a relatively stable level. Compared with farmlands, forestland can better control nutrient losses caused by runoff, alleviate groundwater pollution, and contribute to the control of agricultural non-point source pollution.

Keywords: Surface runoff; Farmland; Forestland; Loss of nitrogen and phosphorus; Groundwater pollution; Non-point source pollution

农田过量养分排放到自然水体中是导致水体污染的主要驱动因素[1]。化肥的大量使用不仅导致了地表水体富营养化[2]，同时也使得地下水受到严重污染[3]。近年来我国农用化肥单位播种面积施用量达 359.10 $kg·hm^{-2}$，是世界平均水平的 2.5 倍，平均化肥面源污染排放强度为 39.11 $kg·hm^{-2}$[4]。朱兆良[5-6]通过对太湖流域麦稻两熟农田的研究得出，小麦(*Triticum aestivum*)和水稻(*Oryza sativa*)适宜施氮量(以 N 计)分别为 120 $kg·hm^{-2}$ 和 102~195 $kg·hm^{-2}$，徐巡军[7]和侯云鹏等[8]提出小麦和水稻的适宜施磷量(以 P 计)分别为 120 $kg·hm^{-2}$ 和 98.2 $kg·hm^{-2}$，而生产上的实际用量已经超过了这一水平。据对洪泽湖地区的调研得知，当地常规麦稻两熟农田的施氮量已经分别达到 217.55 $kg·hm^{-2}$ 和 252.57 $kg·hm^{-2}$，施磷量达 112.47 $kg·hm^{-2}$，远高于适宜施肥量。大量盈余的氮磷养分，通过降雨径流及垂直渗漏等途径流失到水体中，造成水体污染[9]。近年来，国内外有关农田径流造成氮磷流失和水体富营养化已经做过不少研究[10-11]，利用生态沟渠、植物缓冲带等对水体净化和农业面源污染控制的研究工作已逐渐展开[12]，然而关于降雨对农林地径流特征继而对其地下水水质影响的研究仍相对较少，尤其是对洪泽湖地区地下水氮磷污染物含量变化特征的研究几乎没有。

本文通过对洪泽湖河湖交汇区麦稻两熟农田和人工杨树林地进行为期 1 年的地表养分和地下水水质的监测，系统研究了降雨径流引起的地下水水质变化及两者之间的相关性，为有效控制土壤表层氮磷流失，预防地下水污染提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点与样地设置

试验地位于江苏省淮安市洪泽县老子山镇杨圩滩，位于洪泽湖与淮河交汇区，坐标为 118°33′E、33°12′N。洪泽湖地区四季分明，气候温和，全年平均气温 14.9 ℃，年平均降雨量 913.30 mm，汛期在 3 至 9 月，汛期雨量占全年 60%~70%。试验区所处位置如图 1 所示。该地区为平原地形，土壤质地为黏壤土，土壤紧实度较高，土壤 pH 整体呈弱碱性或碱性。表层土壤有机质 24.37 $g·kg^{-1}$，硝态氮 15.36 $mg·kg^{-1}$，氨氮 2.17 $mg·kg^{-1}$，总氮 1.98 $g·kg^{-1}$，总磷 0.82 $g·kg^{-1}$，有效磷 22.41 $mg·kg^{-1}$，有效钾 142.28 $mg·kg^{-1}$。试验区农田利用类型为水旱轮作模式。林地为 3~4 年人工杨树(*Populus* spp.)林，株间距约为 3 m，平均株高为 8.7 m，平均胸径为 7.2 cm。农田试验区选在杨圩滩农户的责任田内，总面积为 0.5 hm^2；林地监测区位于临近农田的人工林区内，总面积约为 6.0 hm^2。

农田与杨树林地每个试验径流小区为 1 000 cm×400 cm 的长方形，面积为 40 m^2，分别设 3 个平行径流小区。每个径流小区均设有径流池，用以收集每次降雨后的径流水样，测量径流总量和检测氮磷指标。小区之间设置田埂，尺寸为 20 cm×20 cm，用塑料薄膜将田埂包裹，并使用 PVC 板将其两侧隔开，防止降雨量较大时水分和养分的串流。试验区域外 2 m 范围内设置保护行，使监测区域与外界分隔开。在试验区附近修建地下水监测井，规格为直径 30 cm，深 500 cm，并做好防止地表水直接流入井内的措施。

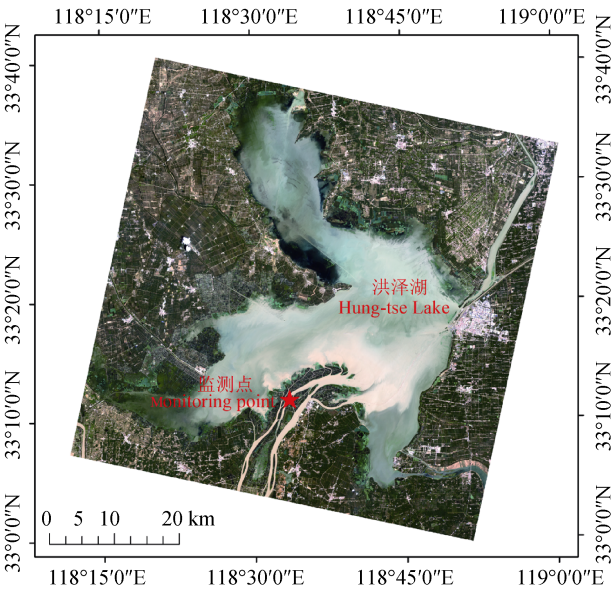

图 1　监测点地理位置图

Fig. 1　Location map of the monitoring point

1.2　田间管理与监测方法

小区内作物或林木的管理方式(施肥方式等)，除定期采样排水外，与当地传统管理方式基本一致。农田第 1 季作物冬小麦于 2015 年 11 月 28 日施基肥(复合肥 449.8 kg·hm^{-2})并播种，分别于 2016 年 2 月 27 日和 4 月 1 日进行第 1 次(尿素 225.0 kg·hm^{-2})和第 2 次追肥(复合肥 300.0 kg·hm^{-2})，6 月 14 日完成收获；第 2 季作物水稻于 2016 年 6 月 10 日播种，7 月 1 日施基肥(复合肥 449. kg·hm^{-2})并完成水稻苗移栽，分别于 8 月 19 日和 10 月 6 日进行第 1 次(尿素 300.0 kg·hm^{-2})和第 2 次追肥(复合肥 300.0 kg·hm^{-2})，11 月 25 日完成收获。杨树林地试验区管理采用当地常规施肥方式，苗木期对杨树进行必要施肥，成林后少量或不施肥，该试验期内未进行施肥。

本次试验周期内，实际降雨量使用 HOBO 自动气象站(RG3-M)记录，保留产生径流的有效降雨数据，试验期内麦田产生径流的有效降雨共 7 次，稻田 6 次，杨树林地 9 次。周期内降雨量(864.4 mm)与往年同时期平均降雨量无明显差异，径流量由径流池内雨水体积计算得到。

1.3　样品采集与分析方法

1.3.1　样品采集

土样采集：试验开始之前，蛇形采样法采集并多点混合 0~20 cm 的表层基础土壤样品，监测期内分别于降雨前后采集小区表层土，用以检测氮磷、含水率等指标。

水样采集：试验期内，每次降雨产流后的径流量由径流池内的水样体积计算得到。充分搅拌水样后，采用多点混合法收集水样于样品瓶中，采样后排空并清理径流池；降雨前后采集水稻田面水、监测井中地下水水样，及时在实验室进行样品分析。

1.3.2　检测方法

水样总氮采用过硫酸钾消解紫外分光光度法测定，硝态氮采用紫外分光光度法测定，铵态氮采用靛酚蓝比色法测定，总磷采用钼酸铵分光光度法测定，可溶性磷和正磷酸盐采用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法测定。土壤样品硝态氮采用酚二磺酸比色法测定，铵态氮采用靛酚蓝比色法测定，有效磷采用石灰性土壤有效磷测定方法测定，土样含水率采用恒温箱烘干法进行处理。

1.4　数据分析

数据分析采用单因素方差分析(ANOVA)Turkey 法来检验氮磷养分指标与各影响因素之间的相关性。所有分析及图表均使用 Microsoft Excel 2016、SPSS 18.0 和 Origin 9.0 统计软件完成。

2　结果与分析

2.1　降雨对表层土壤含水量的影响

与稻田不同，麦田和林地属于旱地，为了探究降雨对麦田和林地径流入渗的影响差异，对二者降雨前后土壤含水量变化进行了监测。如图 2 所示，麦田土壤雨前含水率在 26.07%~34.10%范围内波动，雨后含水率为 29.17%~44.30%；而林地土壤雨前含水率在 10.45%~17.48%范围内变化，雨后含水率为 12.31%~21.60%。对于麦田和林地而言，雨后土壤含水量均比雨前有所增加，麦田土壤平均含水率较雨前提高 8.95%，林地提高 4.05%。林地土壤平均含水率低于麦田，但二者土壤含水量的增幅都随降雨量的增大而增大，麦田含水率增幅与降雨量存在显著相关性(P<0.05)，而林地土壤含水量增幅与降雨量相关性

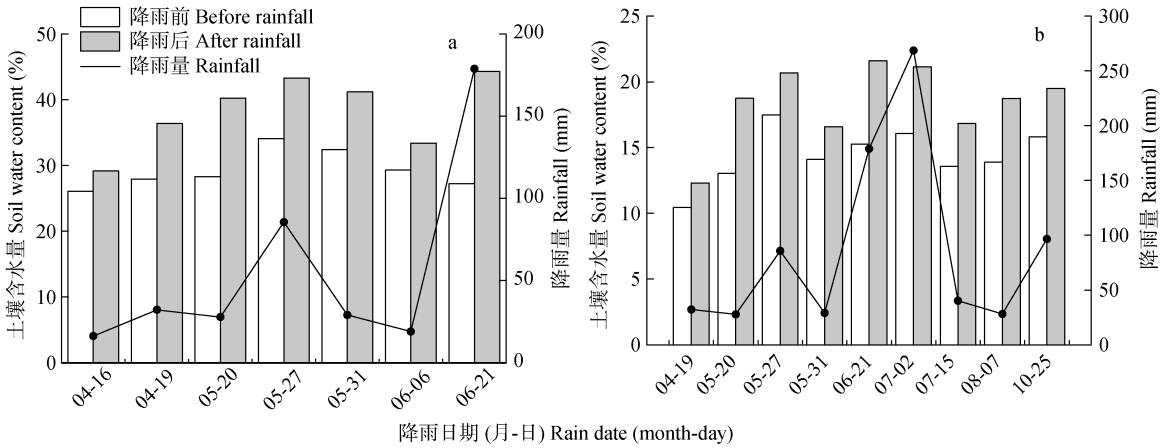

图 2 降雨前后麦田**(a)**和杨树林地**(b)**表层土壤含水量的变化

Fig. 2 Changes of soil water contents of wheat field (a) and poplar forestland (b) before and after rainfall

不大。此外，同一次降雨条件下，林地土壤含水量增幅小于麦田，以 6 月 21 日的较大降雨为例，麦田土壤含水量较雨前增加 62.87%，而林地土壤含水量只增加 41.55%。

2.2 降雨对表层土壤养分含量的影响

本试验所记录的有效降雨条件下，即在产生降雨径流的降雨过程中，农田和林地表层养分势必会随着径流而流失。由降雨前后表层土壤(稻田为田面水)养分含量变化，可计算出由降雨引起的农田养分流失量，如图 3 所示。对于麦田(图 3a)而言，各次降雨所引起的土壤硝态氮、有效磷流失量基本随降雨量的变化而变化，铵态氮流失量在多次降雨过程中变化不明显。麦季表层土壤硝态氮、铵态氮和有效磷流失总量分别为 63.53 $mg\cdot kg^{-1}$、5.61 $mg\cdot kg^{-1}$ 和 57.43 $mg\cdot kg^{-1}$，而 4 月 16 日降雨引起氮磷流失量较大的原因可能是追肥引起的。图 3b 中稻田田面水养分流失主要发生在 7 月份的两次较大降雨过程中，不同降雨之间养分流失差异明显，氮磷流失量与降雨密切相关，稻季田面水硝态氮、铵态氮、可溶性磷和颗粒态磷流失总量为 8.32 $mg\cdot L^{-1}$、27.44 $mg\cdot L^{-1}$、2.39 $mg\cdot L^{-1}$ 和 2.99 $mg\cdot L^{-1}$。从图 3c 可以看出，与农田不同，杨树林地各形态氮磷养分流失量与降雨量关系并不明显，多次降雨过程中养分流失量变化不大，硝态氮、铵态氮和有效磷流失量分别在 1.37~3.67 $mg\cdot kg^{-1}$、0.13~0.38 $mg\cdot kg^{-1}$ 和 0.01~0.15 $mg\cdot kg^{-1}$ 范围内波动，监测期内三者流失总量为 16.78 $mg\cdot kg^{-1}$、2.45 $mg\cdot kg^{-1}$、0.73 $mg\cdot kg^{-1}$，明显低于监测期内农田氮磷流失总量。

2.3 农田与杨树林地降雨后的径流特征

将麦田、稻田和林地的有效降雨量(x)与径流量(y)分别进行线性回归分析(图 4)，三者关系式分别为 $y_{麦田}=0.021\ 91x-0.071\ 91$ ($R^2=0.971\ 6$)、$y_{稻田}=0.021\ 21x-0.088\ 80$ ($R^2=0.992\ 3$)、$y_{林地}=0.011\ 43x-0.260\ 05$ ($R^2=0.993\ 2$)。在所监测得到的降雨量范围内，三者降雨量与径流量的相关性均达极显著水平($P<0.01$)，径流量随降雨量的增大而增大，但林地径流量的升高速率远小于农田。同一次降雨过程中，杨树林地径流量均小于农田，或因降雨量较小不产生径流。根据线性分析计算，麦田、稻田和林地产生径流的理论最小降雨量分别为 3.3 mm、4.2 mm 和 22.8 mm，而试验期内所监测的实际最小有效降雨量分别为 16.2 mm、19.8 mm、27.8 mm。

将监测期内多次降雨产生的径流养分浓度及对应的降雨量进行相关性分析可得(表 1)，麦田总氮、硝态氮、总磷、可溶性磷径流浓度与降雨量相关性不明显，铵态氮和正磷酸盐径流浓度与降雨量明显相关($P<0.05$)。稻田径流中总氮、硝态氮浓度与降雨量极显著相关($P<0.01$)，而铵态氮、总磷、可溶性磷和正磷酸盐浓度与降雨量为显著相关($P<0.05$)。杨树林地各形态氮磷养分径流浓度与降雨量的相关性均达极显著水平($P<0.001$)。降雨量对磷素养分的影响与氮素基本相似，但程度和养分类型有所差异，其中杨树林地径流各形态养分浓度与降雨量相关性最强，稻田次之，小麦田最弱。

2.4 地下水污染物浓度与径流养分浓度的关系

表 2 为农田、林地地下水氮磷素含量与径流养分含量之间的关系。由表 2 可见，除麦田硝态氮、稻田可溶性磷外，农田地下水和径流间的各形态氮磷元素含量均存在一定相关性，麦田相关系数为 0.707~0.959，稻田相关系数为 0.865~0.970。其中，麦田地下水和径流之间总磷、可溶性磷含量的相关

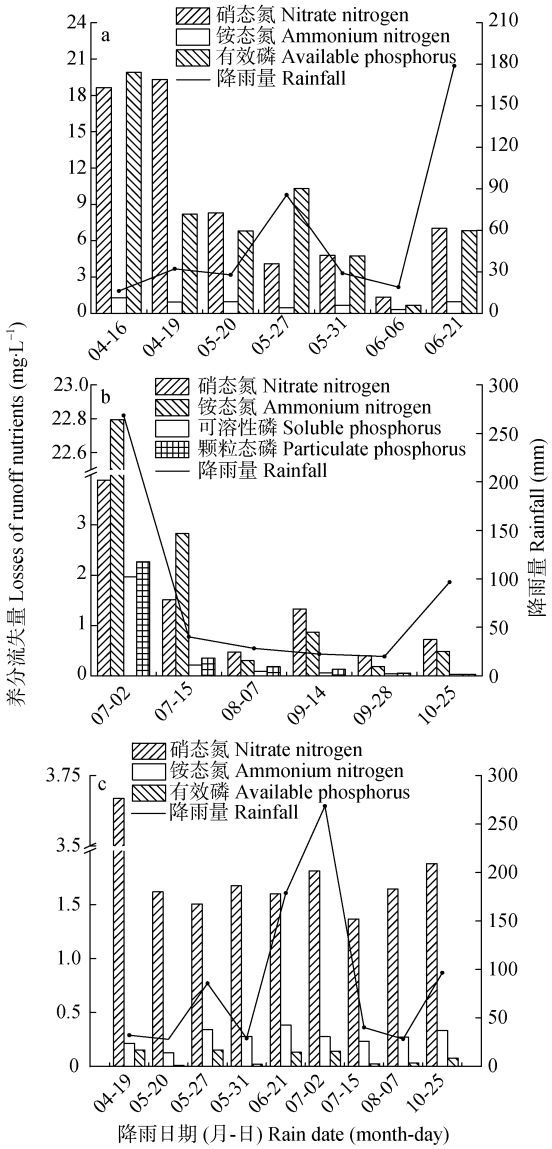

图 3　降雨对小麦田表层土壤(a)、稻田田面水(b)以及杨树林地表层土壤(c)养分径流流失量的影响

Fig. 3　Effects of rainfall on nutrient losses of runoff in surface soil of wheat field (a), surface water of rice field (b) and surface soil of poplar forestland (c)

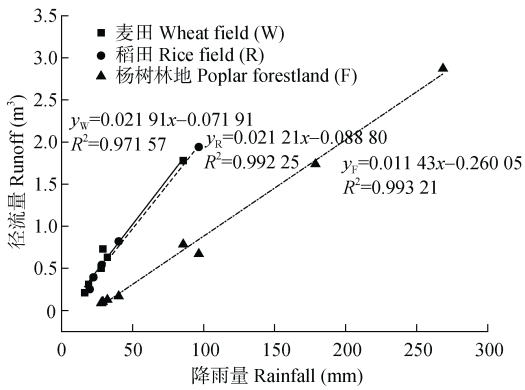

图 4　稻田、麦田和杨树林地径流量与降雨量的关系

Fig. 4　Relationship between runoff and rainfall of rice and wheat fields and poplar forestland

性达极显著水平(P<0.01)，总氮、氨氮和正磷酸盐含量也达显著相关水平(P<0.05)；稻田地下水和径流之间总氮、总磷含量的相关性达显著相关水平(P<0.05)，硝氮、氨氮与正磷酸盐含量达极显著相关水平(P<0.01)。相反，林地地下水和径流之间各形态元素浓度相关系数为 0.056~0.580，无显著相关性，径流养分含量对地下水氮磷含量影响不明显。

3　讨论

3.1　降雨对表层含水率和养分流失的影响

氮磷流失不仅与地表径流过程相关[13]，土壤含水量也是影响氮磷迁移、流失的重要因素之一[14]。监测期内林地土壤平均含水率低于麦田，树冠的截留作用使其降雨后含水率的增幅也明显低于后者[15]，这也就导致了麦田与杨树林地养分径流流失的差异，因为含水率的大小影响了土壤中溶解态氮磷养分的存在比例[16]。通过对降雨前后麦田、稻田和杨树林地表层养分变化的比较，三者养分流失量存在明显差异。麦田养分流失量基本随降雨量的增大而增大，4 月 16 日的降雨(16.2 mm)引起硝态氮和有效磷的大量流失，可能是因为此次降雨是追肥后的首次有效降雨，造成追肥效果减弱；与麦田土壤相似，稻田田面水氮磷流失特征与降雨量也存在密切关系，不同的是稻田铵态氮流失比例较大，这是因为在淹水条件下，稻田硝化作用受到抑制，较为活跃的反硝化作用导致铵态氮大量流失[17]，而且田面水的覆盖作用减弱了雨水的扰动效果[18]，使得氮磷流失总量小于麦田。林地养分流失量受降雨干扰程度较小，基本不随降雨量的变化而波动，林地养分输出水平并不高，林地土壤中的养分流失也远低于对农业面源污染贡献较高的农田[19-20]。

3.2　降雨对地表径流特征的影响

养分流失受气候、降雨、土壤、地形、植被和耕作方式等多重因素影响[21-22]，而且径流过程是决定面源式营养盐运输转移特征的关键因素之一[23]。本试验中，农田与杨树林地径流量均随降雨量的增大而增大，且存在极强的相关性。冯亚文等[24]在对长江流域降水径流特征研究中也得出相似结论。但农田产生径流的最小降雨量远小于杨树林地，这是因为林地根系、凋落物等在这一过程中起到了截留降水的作用[25-26]，使得林地比农田具有更好的涵养水源、保持水土的能力[27]，所以监测期内的相同降雨条件下，杨树林地的径流量远小于农田或者不产

表 1 麦田、稻田和杨树林地径流养分浓度与降雨量的相关性

Table 1 Correlation between nutrient concentration in runoff and rainfall of wheat field, rice field and poplar forestland

	氮素 Nitrogen			磷素 Phosphorus		
	总氮 Total nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	铵态氮 Ammonium nitrogen	总磷 Total phosphorus	可溶性磷 Soluble phosphorus	正磷酸盐 Orthophosphate
麦田 Wheat field	0.515	0.548	0.591*	0.380	0.145	0.759*
稻田 Rice field	0.861**	0.941***	0.774*	0.745*	0.737*	0.748*
杨树林地 Poplar forestland	0.826***	0.846***	0.848***	0.819***	0.916***	0.864***

*: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$.

表 2 麦田、稻田和杨树林地地下水氮磷含量(y)与径流养分含量(x)的相关性

Table 2 Correlation between nitrogen or phosphorus in groundwater (y) and nutrients content in runoff (x)

养分 Nutrient	麦田 Wheat field			稻田 Rice field			杨树林地 Poplar forestland		
	回归方程 Regression equation	R	n	回归方程 Regression equation	R	n	回归方程 Regression equation	R	n
总氮 Total nitrogen	y=0.315 6x+2.242 4	0.837*	7	y=0.241 2x+3.243 9	0.865*	6	y=–0.323 8x+3.844 1	0.552	8
硝态氮 Nitrate nitrogen	y=0.295 3x+0.126 4	0.681	7	y=0.853 4x–0.942 4	0.934**	6	y=–0.033 3x+0.802 3	0.110	8
铵态氮 Ammonia nitrogen	y=0.237 9x+0.483 8	0.707*	7	y=0.023 0x+0.552 2	0.938**	6	y=–0.100 9x+0.486 7	0.165	8
总磷 Total phosphorus	y=0.004 7x+0.008 0	0.944**	7	y=0.064 5x+0.010 5	0.899*	6	y=0.479 1x+0.010 4	0.098	8
可溶性磷 Soluble phosphorus	y=0.007 1x+0.003 1	0.959**	7	y=0.112 7x+0.004 1	0.564	6	y=–0.202 0x+0.008 8	0.580	8
正磷酸盐 Orthophosphate	y=0.003 1x+0.002 5	0.759*	7	y=0.121 7x–0.001 1	0.970**	6	y=0.0385 x+0.003 7	0.056	8

*: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$.

生径流。而地表径流的产生是土壤氮磷流失、水体污染不可忽视的因素[28]。本研究中降雨对氮磷流失的影响基本相似，稻田与林地氮磷径流浓度与降雨量相关性显著，随着降雨量的增加，径流中各形态氮磷浓度也随之先迅速增加后缓慢上升；麦田径流总氮、硝态氮、总磷和可溶性磷浓度与降雨量没有明显相关性，这可能是因为与稻田和林地相比，雨水对麦田土壤较强的冲击扰动能力改变了各形态氮磷养分的比例[29]。

3.3 径流对地下水氮磷含量的影响

土壤氮磷流失不仅对地表水体造成污染，而且还会向下淋溶造成地下水污染[30]。本研究表明，农田地下水氮磷含量和径流养分含量具有很强的相关性，当径流中氮磷含量增大时，相应的地下水氮磷含量也会随之升高，说明农田盈余的氮磷存在极强的环境风险[31]。麦田地下水硝态氮含量与径流无明显相关性，是因为雨水淋溶过程中硝态氮更容易向下迁移，导致地下水中含量高而地表径流中含量较低[32-33]。而稻田可溶性磷的下渗过程与麦田硝态氮相反，田面水使得可溶性磷向下迁移的趋势减弱，更倾向于地表水体的水平迁移[34]。与农田相反，林地地下水氮磷含量与径流养分含量没有显著相关性，对地下水水质影响不明显，林地中植物根系、生物多样性等因素为此做出了重要贡献[35]。而且在产生地表径流时地下水中氮素含量降低，造成这种现象可能是因为降雨量的增加导致地下水中的氮被稀释。

4 结论

此次研究表明，农田养分流失量受降雨干扰程度较大，而林地与此相反，且养分输出水平低；此外，农田产生径流的降雨量远小于林地，相同降雨条件下，林地的径流量小于农田或者不产生径流；农田地下水氮磷含量和径流养分含量具有很强的相关性，当径流中氮磷含量增大时，相应形态的地下水氮磷含量也会随之升高，林地径流养分含量对地下水水质无显著影响。因此林地在农林生态系统起到了污染受纳者的作用，对控制径流养分流失、缓解地下水污染具有不可替代的作用。

参考文献 References

[1] 杨林章，吴永红. 农业面源污染防控与水环境保护[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 168–176
YANG L Z, WU Y H. Prevention and control of agricultural non-point source pollution and aquatic environmental protection[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(2): 168–176

[2] 陈勇，冯永忠，杨改河. 农业非点源污染研究进展[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(8): 173–181
CHEN Y, FENG Y Z, YANG G H. Study advances on agriculture non-point source pollution[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2010, 38(8):

173–181

[3] 孟利, 左锐, 王金生, 等. 基于 PCA-APCS-MLR 的地下水污染源定量解析研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(10): 3773–3786
MENG L, ZUO R, WANG J S, et al. Quantitative source apportionment of groundwater pollution based on PCA-APCS-MLR[J]. China Environmental Science, 2017, 37(10): 3773–3786

[4] 史常亮, 李赟, 朱俊峰. 劳动力转移、化肥过度使用与面源污染[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(5): 169–180
SHI C L, LI Y, ZHU J F. Rural labor transfer, excessive fertilizer use and agricultural non-point source pollution[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(5): 169–180

[5] 朱兆良. 稻田节氮的水肥综合管理技术的研究[J]. 土壤, 1991, 23(5): 241–245
ZHU Z L. Study on comprehensive management of nitrogen in rice field[J]. Soil, 1991, 23(5): 241–245

[6] 朱兆良. 推荐氮肥适宜施用量的方法论刍议[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 1–4
ZHU Z L. On the methodology of recommendation for the application rate of chemical fertilizer nitrogen to crops[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(1): 1–4

[7] 徐巡军. 沿江潮土稻麦轮作下磷素临界指标研究[J]. 现代农业科技, 2016, (12): 215–217
XU X J. Study on the critical index of phosphorus in rice and wheat rotation in tidal soils along the river[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2016, (12): 215–217

[8] 侯云鹏, 孔丽丽, 李前, 等. 不同施磷水平下水稻产量、养分吸收及土壤磷素平衡研究[J]. 东北农业科学, 2016, 41(6): 61–66
HOU Y P, KONG L L, LI Q, et al. Studies on effect of different phosphorus levels on yield, nutrient absorption of rice and soil phosphorus balance[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2016, 41(6): 61–66

[9] 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 Y S, LIANG X Q, LI L, 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

[10] OUYANG W J, LI Z, LIU J, et al. Inventory of apparent nitrogen and phosphorus balance and risk of potential pollution in typical sloping cropland of purple soil in China — A case study in the Three Gorges Reservoir region[J]. Ecological Engineering, 2017, 106: 620–628

[11] ZHANG W Q, JIN X, LIU D, et al. Temporal and spatial variation of nitrogen and phosphorus and eutrophication assessment for a typical arid river — Fuyang River in northern China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, 55: 41–48

[12] 张树楠, 肖润林, 刘锋, 等. 生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应[J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4516–4522
ZHANG S N, XIAO R L, LIU F, et al. Interception effect of vegetated drainage ditch on nitrogen and phosphorus from drainage ditches[J]. Environmental Science, 2015, 36(12): 4516–4522

[13] 席运官, 田伟, 李妍, 等. 太湖地区稻麦轮作系统氮、磷径流排放规律及流失系数[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(3): 534–540
XI Y G, TIAN W, LI Y, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses and loss coefficients in rice-wheat rotation system in Taihu Lake basin[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2014, 30(3): 534–540

[14] 王丽, 王力, 王全九. 前期含水量对坡耕地产流产沙及氮磷流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2171–2178
WANG L, WANG L, WANG Q J. Effect of antecedent soil moisture on runoff and sediment and nitrogen and phosphorus losses from slope cropland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(11): 2171–2178

[15] HOLDER C D, GIBBES C. Influence of leaf and canopy characteristics on rainfall interception and urban hydrology[J]. Hydrological Sciences Journal, 2017, 62(2): 182–190

[16] GRANOVSKY A V, MCCOY E L, DICK W A, et al. Impacts of antecedant moisture and soil surface mulch coverage on water and chemical transport through a no-till soil[J]. Soil and Tillage Research, 1994, 32(2/3): 223–236

[17] 陆敏, 刘敏, 黄明蔚, 等. 大田条件下稻麦轮作土壤氮素流失研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1234–1239
LU M, LIU M, HUANG M W, et al. Field study of nitrogen loss in soil with rice-wheat rotation system[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(5): 1234–1239

[18] 梁新强, 田光明, 李华, 等. 天然降雨条件下水稻田氮磷径流流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 59–63
LIANG X Q, TIAN G M, LI H, et al. Study on characteristic of nitrogen and phosphorus loss from rice field by natural rainfall runoff[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(1): 59–63

[19] 徐嘉兴, 李钢, 渠俊峰, 等. 洪泽湖地区土地利用与景观格局演变[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(10): 1211–1216
XU J X, LI G, QU J F, et al. Land use and landscape pattern in Hongze lake basin[J]. Resources and Environment of the Yangtze River Basin, 2011, 20(10): 1211–1216

[20] 陈磊, 李占斌, 李鹏, 等. 野外模拟降雨条件下水土流失与养分流失耦合研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(S1): 170–176
CHEN L, LI Z B, LI P, et al. The coupling effect on soil erosion and nutrient lost under a simulated rainfall[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(S1): 170–176

[21] 李发荣, 邱学礼, 周璟, 等. 滇池东南岸农业和富磷区入湖河流地表径流及污染特征[J]. 中国环境监测, 2014, 30(6): 93–101
LI F R, QIU X L, ZHOU J, et al. Surface runoff and pollutants characteristics of inflowing rivers in the agricultural and phosphorus-rich region on the southeast coast of the lake Dianchi[J]. Environmental Monitoring in China, 2014, 30(6): 93–101

[22] NEARING M A, JETTEN V, BAFFAUT C, et al. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation

and cover[J]. CATENA, 2005, 61(2/3): 131–154

[23] 赖格英, 于革. 流域尺度的营养物质输移模型研究综述[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(5): 574–578
LAI G Y, YU G. An overview: Development of nutrient transport models at catchment scale[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 14(5): 574–578

[24] 冯亚文, 任国玉, 刘志雨, 等. 长江上游降水变化及其对径流的影响[J]. 资源科学, 2013, 35(6): 1268–1276
FENG Y W, REN G Y, LIU Z Y, et al. Rainfall and runoff trends in the upper Yangtze River[J]. Resources Science, 2013, 35(6): 1268–1276

[25] 张奇春, 王雪芹, 楼莉萍, 等. 毛竹林生态系统地表径流及其氮素流失形态研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 23–26
ZHANG Q C, WANG X Q, LOU L P, et al. Studies on surface runoff and nitrogen loss in Bamboo forest ecosystem[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 23–26

[26] 王丹丹, 张建军, 丁杨, 等. 晋西黄土区退耕林地土壤抗冲性研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 14–18
WANG D D, ZHANG J J, DING Y, et al. Research on soil anti-erosion of grain for green mixed forest in loess plateau of Western Shanxi Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(3): 14–18

[27] 李俊然, 陈利顶, 郭旭东, 等. 土地利用结构对非点源污染的影响[J]. 中国环境科学, 2000, 20(6): 506–510
LI J R, CHEN L D, GUO X D, et al. Effects of land use structure on non-point source pollution[J]. Chinese Environmental Science, 2000, 20(6): 506–510

[28] 何晓玲, 郑子成, 李廷轩. 不同耕作方式对紫色土侵蚀及磷素流失的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(12): 2492–2500
HE X L, ZHENG Z C, LI T X. Effects of tillage practices on soil erosion and phosphorus loss in sloping cropland of purple soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(12): 2492–2500

[29] 王鹏, 徐爱兰. 太湖流域典型圩区农田氮素地表径流迁移特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1335–1339
WANG P, XU A L. Nitrogen losses with surface runoff from farm lands in polder area around Taihu Basin[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(4): 1335–1339

[30] 王全九, 沈晋, 王文焰, 等. 降雨条件下黄土坡面溶质随地表径流迁移实验研究[J]. 水土保持学报, 1993, 7(1): 11–17
WANG Q J, SHEN J, WANG W Y, et al. The laboratory experiment of solute in loess slope moving with surface runoff[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1993, 7(1): 11–17

[31] 鲁如坤. 土壤-植物营养学原理和施肥[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998
LU R K. Principles of Soil-Plant Nutrition and Fertilization[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1998

[32] 刘园园, 史书, 木志坚, 等. 三峡库区典型农业小流域水体氮磷浓度动态变化[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2014, 36(11): 157–163
LIU Y Y, SHI S, MU Z J, et al. Dynamic changes of water nitrogen and phosphorus concentrations in a typical small agricultural watershed of the Three-Gorges Reservoir Region[J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2014, 36(11): 157–163

[33] ANAYAH F M, ALMASRI M N. Trends and occurrences of nitrate in the groundwater of the West Bank, Palestine[J]. Applied Geography, 2009, 29(4): 588–601

[34] 周萍, 范先鹏, 何丙辉, 等. 江汉平原地区潮土水稻田面水磷素流失风险研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(4): 47–50
ZHOU P, FAN X P, HE B H, et al. Research on loss risk of phosphorus in surface water of paddy soil in Jianghan Plain Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(4): 47–50

[35] GUNDALE M J, DELUCA T H, FIEDLER C E, et al. Restoration treatments in a Montana ponderosa pine forest: Effects on soil physical, chemical and biological properties[J]. Forest Ecology and Management, 2005, 213(1/3): 25–38