

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.01.023.

王荣嘉, 张建锋, 蔡春菊, 等. 不同土地利用方式对长三角水源地氮磷流失的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 128-133.

WANG Rongjia, ZHANG Jianfeng, CAI Chunju, et al. Effects of Different Land Uses on Nitrogen & Phosphorus Losses of Water Source Areas in Yangtze River Delta[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 128-133.

不同土地利用方式对长三角水源地氮磷流失的影响

王荣嘉¹, 张建锋¹, 蔡春菊², 雷刚³

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 杭州 311400;

2. 国际竹藤中心三亚研究基地, 海南 三亚 572000; 3. 国际竹藤中心安徽太平试验中心, 安徽 黄山 245718)

摘要:太湖流域是我国长江三角洲地区最重要的水源地之一, 受到水源地土地利用方式的影响, 面源污染依然严重。为了控制氮磷流失, 研究以长三角重要水源地安吉赋石水库集水区为研究区, 通过野外径流观测探究了不同立地下的氮磷流失特征。结果表明: (1) 该地区经济林 TN 平均流失浓度最大, 为 3.21 mg/L。TP 平均流失浓度表现为经济林 (0.13 mg/L) > 白茶 (0.09 mg/L) > 自然地 (0.07 mg/L) = 次生林 (0.07 mg/L)。次生林地能够有效减少氮磷流失。(2) 降雨强度和降雨量是影响该地区氮素流失的主要降雨因素。(3) 硝态氮和溶解态磷分别是该区氮磷流失的主要形态。(4) 氮素污染是影响水质的关键因素, 因此在面源污染治理过程中要加强对氮素流失的控制。综上, 通过优化水源地土地利用方式, 营建结构合理的水源防护林, 有助于改善水源地环境, 保障饮用水安全。

关键词:面源污染; 水源地; 土地利用方式; 氮素流失; 磷素流失

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)01-0128-06

Effects of Different Land Uses on Nitrogen & Phosphorus Losses of Water Source Areas in Yangtze River Delta

WANG Rongjia¹, ZHANG Jianfeng¹, CAI Chunju², LEI Gang³

(1. Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400,

China; Sanya Research Base of International Bamboo and Rattan Center, Sanya, Hainan 572000, China;

3. Anhui Taipin Test Center of International Centre for Bamboo and Rattan, Huangshan, Anhui 245718, China)

Abstract: The Taihu Lake Basin is one of the most important water source areas in the Yangtze River Delta region. Due to different land uses in the water sources area, non-point source pollution is still serious. To control the losses of nitrogen (N) and phosphorus (P), we took the Fushi Reservoir catchment in Anji, an important water source in the Taihu Lake Basin, as the test plot, and explored the characteristics of N and P losses with different land uses through field runoff observations. The results showed that: (1) the average loss of TN in economic forests in this region was the largest, which was 3.21 mg/L; the average loss concentration of TP decreased in the order: economic forest (0.13 mg/L) > white tea (0.09 mg/L) > natural land (0.07 mg/L) = secondary forest (0.07 mg/L); clearly, secondary forests could effectively reduce the losses of N and P; (2) rainfall intensity and rainfall volume were the main rainfall factors affecting N loss in this area; (3) nitrate-N and DP were the main forms of N and P loss; (4) N pollution was the key factor that impacted water quality, so it was necessary to strengthen the control of N loss. Obviously, optimizing the land uses of water source areas and constructing well-structured water source shelter forests are helpful to improve the environment of water source areas and ensure drinking water safety.

收稿日期: 2021-11-05

修回日期: 2021-12-10

资助项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资助项目 (CAFYBB2019SY014); 国际竹藤中心基本科研业务费学科项目 (1632021006)

第一作者: 王荣嘉 (1994—), 男, 山东淄博人, 博士研究生, 研究方向: 面源污染生态修复。E-mail: wangrongjia0112@163.com

通信作者: 张建锋 (1966—), 男, 山东东阿人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事面源污染防治和退化土地生态修复研究。E-mail: Zhangk126@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

Keywords: non-point source pollution; water source area; land use type; nitrogen loss; phosphorus loss

在全球范围内,饮用水安全问题依然严重,其中一个重要原因是水源地土地利用不当,导致农业面源污染,产生水体富营养化,进一步影响水源地周边居民的身体健康^[1]。孙士咏^[2]在研究中发现,在不同土地利用方式下,其植被覆盖及施肥制度有所区别,导致氮磷流失存在较大差异。因此,探讨不同土地利用方式对水源地氮磷流失的影响有重要意义。

长江三角洲地区是我国经济最发达、人口最密集的地区之一。根据《2020 中国生态环境状况公报》,2020 年,太湖流域作为长三角地区最重要的水源地仍处于轻度污染状态,其中湖心区和北部沿岸区为轻度污染状态,而西部沿岸区达到了轻度污染状态。此外报告还指出,总磷(TP)是太湖地区主要污染物之一。此外,Lian 等^[3]在太湖流域的研究表明,氮素污染是影响水质的主要因素。Yan 等^[4]在太湖流域西部 Zongjiaqiao River 集水区的研究发现,该地区总氮(TN)流失量为 8.49 t,氨氮流失量为 4.22 t。进一步研究表明,太湖流域面源污染严重,与水源地土地利用方式密切相关^[5]。大体上,长三角地区水源地位于丘陵山地,土地利用方式主要有次生林、经济林、自然地等。受不同植被覆盖与经营强度等的影响,不同土地利用方式的水源地氮磷流失程度差异很大。王永平等^[6]在云南东大河流域的研究显示该地区耕地的 TN 流失量为 3.46 t/(km²·a),TP 流失量为 1.36 t/(km²·a),而林地的 TN 流失量和 TP 流失量分别为 0.45 t/(km²·a)和 0.06 t/(km²·a),均显著小于耕地的氮磷流失量。武阳等^[7]在研究中发现植被覆盖良好的立地,氮磷流失量一般相对较少。这表明通过改变土地利用方式,能够有效减少氮磷流失从而有利于控制面源污染。长三角是我国经济最发达的地区之一,然而目前对于长三角水源地面源污染研究相对较少,氮磷流失与水源地土地利用方式的关系如何? 尚未开展系统研究。

基于此,本研究以长三角地区重要水源地,浙江省安吉县赋石水库集水区为例,探究该地区不同土地利用方式(白茶,自然地,经济林和次生林)对氮磷流失的影响,以期为水源地面源污染治理和水源地土地利用方式优化提供理论依据和科学指导,推动水源地环境改善,保障周边居民饮用水安全。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

赋石水库位于中国浙江省北部的安吉县。安吉县位于东经 119°14′—119°53′,北纬 30°23′—30°53′,地势西南高、东北低。属亚热带海洋性季风气候,光照充足、气候温和、雨量充沛、四季分明,全年平均温度为 12.2~15.6℃,年降雨量为 1 100~1 900 mm,年均降雨天数为 164 d,年均日照时长为 2 015 h。

赋石水库是安吉县最大的水库水源地,被誉为浙北第一库,库容 2.17 亿 m³,水深 28 m。泄洪时通过水渠与西苕溪相连,并最终汇入太湖。根据世界土壤资源参比基础(WRB),本地区土壤主要为水耕人为土(hydragric)以及石质薄层土(lithic)^[8-9]。

1.2 样品采集

在 2020 年 8 月选择白茶,自然地,经济林(以板栗为主)和次生林(以木荷为主)等有代表性的立地建立径流小区。每个径流小区为 1 m×1 m,在径流小区底部设有径流桶,用于接取地表径流。白茶和经济林(例如板栗)是当地的主要经济作物,由当地农户进行集约管理耕作,白茶施肥量为 2 250 kg/hm²复合肥,板栗林施肥量略低,约 1 500 kg/hm²复合肥。自然地指尚未开垦的土地,大多生长有杂草。次生林,包括木荷等树种,是在经济林种植一段时间后,土壤养分下降,不利于经济林生长,因而弃耕弃种,经自然演替形成的次生林。本研究中不同土地利用方式的土壤类型均为石质薄层土。不同径流小区基本情况见表 1。

表 1 研究区不同立地基本情况

类别	胸径/ cm	树高/ m	地被 覆盖/%	坡度/ (°)	土壤全碳/ (g·kg ⁻¹)	土壤全氮/ (g·kg ⁻¹)	土壤有效氮/ (g·kg ⁻¹)	土壤全磷/ (g·kg ⁻¹)	土壤有效磷/ (mg·kg ⁻¹)
白茶	—	—	50	3	34.28	3.30	0.39	1.10	206.78
自然地	—	—	95	31	22.81	2.17	0.24	0.48	9.04
经济林	8.04	8.34	30	35	35.32	2.68	0.28	0.50	10.18
次生林	5.97	5.54	60	42	24.32	2.01	0.21	0.29	2.77

采样时间为 2020 年 9 月至 2021 年 8 月,为期一年,共收集有效降雨 6 次(表 2)。研究期间发生多次降雨,但部分降雨由于降雨强度小或降雨量较小,无法产生地表径流,难以获取地表径流进行分析,故不

计入本研究,文中有效降雨为能够产生地表径流的降雨。每次降雨后,先将接取地表径流的径流桶混匀,再用 250 ml 聚乙烯瓶采集 3 个径流小区的地表径流,每种水样取样三次。每次降雨后,尽快完成水样

的采集,采样过程中用保温箱和冰袋低温冷藏保持水样。采样完成后用冰箱 4℃ 保存水样,以减少水样中微生物对水样氮磷浓度的影响。

表 2 2020—2021 年观测降雨事件

采样日期	编号	累计降雨量/mm	降雨时长/h	平均降雨强度/(mm·h ⁻¹)	单位时间最大累积降雨量/mm
2020-09-20	200920	200.0	54.0	3.7	18.5
2021-03-23	210323	138.0	46.0	3.0	17.5
2021-07-06	210706	107.5	25.0	4.3	12.0
2021-07-29	210729	380.5	77.0	4.9	15.0
2021-08-17	210817	231.0	55.0	4.2	32.0
2021-08-30	210830	231.0	11.0	21.0	15.5

1.3 样品测定及数据分析

水样测定指标主要包括全氮(TN),硝态氮,氨氮,全磷(TP),溶解态磷(DP)以及颗粒态磷(PP)。水样全氮测定:过硫酸钾氧化—紫外分光光度法。氨氮测定:靛酚蓝比色法。硝态氮测定:紫外分光光度法。TP 浓度的测定:过硫酸钾氧化—钼蓝比色法,溶解态磷(DP)浓度的测定:先将水样用 45 μm 滤膜过滤,再用过硫酸钾氧化—钼蓝比色法,颗粒态磷(PP)浓度的测定:差减法,即 PP=TP-DP。

数据处理采用 R3.6.2,Excel 2016 以及 SPSS 19.0。采用 Excel 2016 绘制不同立地的氮磷流失情况。利用 SPSS 19.0 对不同立地间的氮磷流失情况进行 LSD 显著性分析。利用 R3.6.2 对不同立地的氮磷流失与降雨因素进行相关性分析。

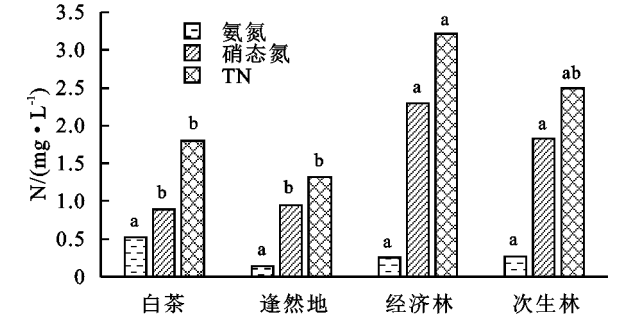
2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下氮素流失

由图 1 看出,经济林 TN 平均流失浓度最大,达到了 3.21 mg/L,其次为次生林和白茶,TN 平均流失浓度分别为 2.49 mg/L 和 1.80 mg/L。同时,经济林的 TN 平均流失浓度显著高于白茶和自然地的 TN 平均流失浓度($p<0.05$)。白茶的氨氮平均流失浓度最大,达到了 0.52 mg/L。而经济林和次生林的氨氮平均流失浓度较为接近,分别为 0.25 mg/L 和 0.26 mg/L。经济林硝态氮平均流失浓度最大,为 2.29 mg/L,其次为次生林(1.83 mg/L)。而白茶的硝态氮平均流失浓度最小,仅为 0.89 mg/L。同时研究表明,经济林的硝态氮平均流失浓度显著高于自然地和白茶($p<0.05$)。

此外,对不同立地的氮素流失形态进一步探究发现,不同立地的氮素流失均以硝态氮为主,占 49.35%~73.64%,而氨氮只占氮素流失的 7.87%~28.89%。具体而言,次生林的硝态氮流失占比最大,为 73.64%。同时,自然地和经济林的硝态氮流失占比均高于 70%,

分别为 71.89%和 71.38%。而白茶的硝态氮流失占比最低,仅为 49.35%。但是,白茶的氨氮流失占比最大,达到了 28.89%,而经济林的氨氮流失占比最低(7.87%)。此外,自然地和次生林的氨氮流失占比均高于 10%,分别为 11.24%和 10.54%。

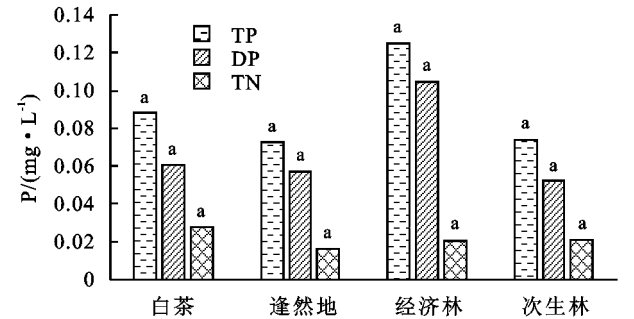


注:图中不同字母代表不同土地利用下氮素流失存在显著差异($p<0.05$)。

图 1 不同土地利用下氮素流失特征

2.2 不同土地利用方式下磷素流失

由图 2 看出,经济林 TP 平均流失浓度最大,为 0.13 mg/L,而白茶的 TP 平均流失浓度次之,为 0.09 mg/L。次生林与自然地的 TP 平均流失浓度一致,均为 0.07 mg/L。与 TP 平均流失浓度相似,经济林 DP 平均流失浓度最大,为 0.10 mg/L。而白茶与自然地的 DP 平均流失浓度一致,均为 0.06 mg/L。次生林的 DP 平均流失浓度最小,仅为 0.05 mg/L。与 TP 和 DP 平均流失浓度有所差异,不同立地的 PP 平均流失浓度相接近,白茶,自然地,经济林以及次生林的 PP 平均流失浓度分别为 0.03 mg/L,0.02 mg/L,0.02 mg/L 以及 0.02 mg/L。



注:图中不同字母代表不同土地利用下磷素流失存在显著差异($p<0.05$)。

图 2 不同土地利用下磷素流失特征

对流失磷素的可溶性进一步研究发现,研究区不同立地下磷素流失均以溶解态(DP)为主,占磷素流失的 68.62%~83.79%。其中经济林的 DP 流失占比最大,到达了 83.79%。此外,自然地和次生林的 DP 流失占比均在 70%以上,分别为 77.91%和 71.30%。而白茶的 DP 流失占比最小,仅为 68.62%。

2.3 降雨因素与氮磷流失浓度的相关性

由表 3 可以看出,氨氮平均流失浓度主要受到降雨历时和降雨强度的影响。其中,白茶氨氮平均流

失浓度与降雨历时呈显著负相关($p<0.05$),相关系数为 -0.888 。而自然地和经济林的氨氮平均流失浓度主要与平均雨强呈显著正相关,相关系数分别为 $0.948(p<0.05)$ 和 $0.986(p<0.01)$ 。硝态氮平均流失浓度则在一定程度上受到降雨量的影响。自然地的硝态氮平均流失浓度与累计降雨量呈显著正相关($p<0.05$),相关系数为 0.924 。与氨氮平均流失浓度类似,TN 平均流失浓度也会受到降雨历时和降

雨强度的影响。经济林的 TN 平均流失浓度与降雨历时呈显著负相关($p<0.05$),相关系数为 -0.845 ,但与平均雨强呈显著正相关($p<0.05$),相关系数为 0.877 。PP 平均流失浓度与平均雨强呈正相关,相关系数为 0.806 ,但彼此之间并没有显著性。这也表明与氮素流失有所不同,磷素流失虽然也在一定程度上受降雨因素(例如降雨强度)的影响,但相关性并不显著。

表 3 降雨因素与氮磷流失浓度的相关性

类别	累计降雨量	降雨历时	平均降雨强度	最大降雨强度
白茶氨氮平均流失浓度	-0.348	-0.888 *	0.679	-0.380
自然地氨氮平均流失浓度	0.001	-0.810	0.948 *	-0.425
经济林氨氮平均流失浓度	0.003	-0.777	0.986 * *	-0.293
次生林氨氮平均流失浓度	-0.527	-0.345	-0.082	0.464
白茶硝态氮平均流失浓度	-0.582	-0.020	-0.402	0.004
自然地硝态氮平均流失浓度	0.924 *	0.320	0.235	-0.536
经济林硝态氮平均流失浓度	-0.584	0.171	-0.734	-0.282
次生林硝态氮平均流失浓度	-0.628	-0.405	0.049	-0.370
白茶 TN 平均流失浓度	-0.785	-0.407	-0.277	0.136
自然地 TN 平均流失浓度	0.834	0.262	0.217	-0.011
经济林 TN 平均流失浓度	-0.257	-0.845 *	0.877 *	-0.417
次生林 TN 平均流失浓度	-0.169	0.448	-0.532	0.382
白茶 TP 平均流失浓度	-0.639	-0.274	-0.364	-0.360
自然地 TP 平均流失浓度	0.416	-0.146	0.402	0.453
经济林 TP 平均流失浓度	-0.124	0.077	-0.123	-0.025
次生林 TP 平均流失浓度	0.709	0.528	0.011	-0.104
白茶 DP 平均流失浓度	-0.090	-0.232	0.097	0.251
自然地 DP 平均流失浓度	0.212	0.088	-0.006	0.691
经济林 DP 平均流失浓度	-0.085	0.144	-0.160	0.027
次生林 DP 平均流失浓度	0.121	-0.411	0.548	0.053
白茶 PP 平均流失浓度	-0.360	-0.026	-0.304	-0.404
自然地 PP 平均流失浓度	0.536	-0.410	0.806	-0.045
经济林 PP 平均流失浓度	-0.290	-0.233	0.058	-0.257
次生林 PP 平均流失浓度	0.392	0.545	-0.027	-0.093

注: * 表示在 0.05 水平上呈显著差异, ** 表示在 0.01 水平上呈显著差异。

3 讨论

3.1 不同立地的氮磷流失特征

在本研究中,经济林的氮磷流失浓度最高,白茶的氨氮平均流失浓度最高,这可能是由于农业生产活动,例如施肥所导致的。王剑等^[10]在浙江安吉的研究中发现,施肥是导致该地区白茶氮磷流失的重要因素,通过减少施肥有利于控制白茶的氮磷流失。此外,为了获取更多的经济效益,经济林往往进行集约经营,同时会定期清除杂草,使经济林的地表覆盖减少,这也是导致经济林氮磷流失浓度较高的原因之一。当雨水击打地表,能够破坏土壤表层结构,粉碎土壤颗粒。当地表径流通过时,能够作为氮磷元素迁

移的载体,使氮磷元素随之迁移^[11]。当土壤表层结构被破坏,会使土壤中的氮磷元素更容易随地表径流迁移。而当地表覆盖增多,例如建立水源防护林,就能够减少降雨对地表的击打作用,保护地表。同时地表覆盖提高还能够滞缓地表径流,促进地表径流下渗,从而有利于减少随地表径流迁移的氮磷元素^[12]。在本研究中,与经济林相比,次生林能够减少 20.19% 的 TN 流失和 46.15% TP 流失。因此,建立水源涵养林,增加地表植被覆盖是控制氮磷流失的重要措施。李婷婷等^[13]在广西东北部桂林地区的对果园经济林研究表明,与清除杂草相比,通过生草栽培增加地表植被覆盖能够有效减少氮磷流失。其中金桔间种雀稗(*Paspalum thunbergii*)对氮磷流失的控制效果最

好,能够减少 15.30%~26.49%的 TP 流失,9.97%~48.03%的氨氮流失以及 17.46%~96.46%的硝态氮流失。Wang 等^[14]在研究中提到,与荒地相比,麻栎林能够减少 37.15%的 TN 流失和 47.43%的 TP 流失,刺槐林能够减少 42.42%的 TN 流失和 58.97%的 TP 流失。这些研究结果表明,研究区的农业生产活动,例如白茶和经济林的种植,是造成该地区农业面源污染的重要因素,而建立防护林增加植被覆盖则是减少氮磷流失的有效手段。在实际工作中,进行经济林结构改造,把纯林改建为混交林;或在自然地营建水源涵养林,都能够充分发挥森林的生态功能,减少水土流失,从而有效控制氮磷迁移。

从氮素流失的形态来看,本研究中的氮素流失主要以硝态氮为主,这也与大部分的研究结果相一致。梁爽等人^[15]在湖北下牢河流域的研究表明,该地区的氮素流失主要以硝态氮为主,占 TN 流失 84.3%,而氨氮只占 TN 流失的 8.7%。杨任翔等^[16]在广西南宁对甘蔗地的一项为期两年(2019—2020)的研究表明,硝态氮是氮素流失的主要形态,占 79%以上。这可能是因为土壤胶体一般为负电荷,阴离子较多^[17],而硝态氮的硝酸根也是阴离子,两者相斥导致土壤中的硝态氮极易溶于水。当雨水冲刷叶片和地表土壤,极易将土壤中的硝态氮溶解到水中,从而不断增加硝态氮占比。这些研究也进一步验证了我们的推断。

从磷素的流失形态来看,本研究中的磷素主要以溶解态(DP)流失为主(68.62%~83.79%)。Wang 等^[9]在安吉针对毛竹林的一项研究表明,该地区毛竹林中地表径流磷素流失以 DP 为主,占 TP 流失的 62.76%。梁爽等^[15]在长江流域下牢溪的研究表明,该地区的磷素流失主要以溶解态为主,占磷素流失 63.3%。这些研究都与本研究结果相类似。然而,也有研究提到土壤中的磷素能与土壤胶体相结合,形成 PP^[18],因此,在一些研究中磷素流失以颗粒态为主,与本研究存在一定差异。Guo 等^[19]在中国南方 4 个省份(重庆,贵州,云南和江西)的研究表明,在过垄施肥(cross-ridge with fertilizer)耕作方式中,PP 流失占 TP 流失的 68.4%。Wang 等^[20]在太湖地区关于稻田中 TP 流失形态的研究表明,在 3 种不同施肥模式下(不施肥,施有机肥,施化肥),地表径流 TP 流失均以 PP 流失为主,占 51~85%。这可能是因为在这类研究中多以耕地为研究对象,而耕地存在人工松土翻耕等现象,使土壤破碎,形成细小的土壤颗粒。在这种情况下,当地表径流产生时,土壤颗粒更容易随地表径流迁移,导致了更多的 PP 流失。而本研究中研究对象是山地丘陵,不存在对土壤的人为干扰,同时地表植被覆盖相

对较高,因此磷素流失以溶解态为主。

3.2 降雨因素对氮磷流失的影响

通过上述研究不难发现,降雨强度对氮素流失浓度有较大影响。平均雨强与而自然地和经济林的氨氮平均流失浓度,经济林的 TN 平均流失浓度均呈显著正相关($p < 0.05$)。这可能是因为当雨强增大,对地表土壤的击打作用越强,地表土壤更容易被破坏,导致土壤中的氮素更易随地表径流迁移流失。此外,当雨强增大,单位时间到达地表的降雨量越多,越容易形成地表径流,从而促进氮素流失。王月等^[21]通过人工降雨试验发现,随着降雨强度由 10 mm/h 增加到 25 mm/h, TN 流失量也由 0.67 kg/hm²增加到 9.74 kg/hm²。杨任翔等^[16]也在研究中提到平均雨强与硝态氮流失量呈显著相关,30 min 最大雨强与硝态氮和氨氮的流失量均呈显著正相关。覃自阳等^[22]在喀斯特地区的一项研究表明,当降雨强度由 30 mm/h 增加到 90 mm/h 时, TP 流失量由(237.59 ± 1.07) mg 提高到(815.88 ± 4.82) mg,随着降雨强度的加强, TP 流失量显著增加。

除降雨强度外,降雨量也能够一定程度影响氮素流失浓度。在本研究中,自然地的硝态氮平均流失浓度与累计降雨量呈显著正相关($p < 0.05$)。李吉平等^[23]在洪泽湖地区的研究表明,稻田的硝态氮流失浓度,杨树林的氨氮流失浓度,硝态氮流失浓度以及 TN 流失浓度均与降雨量呈极显著正相关($p < 0.001$)。杨任翔等^[21]在研究中提到降雨量与氨氮流失量以及硝态氮流失量均呈显著正相关,相关系数分别为 0.627, 0.412。这些研究结论都与本研究相一致。

此外,根据当地有关部门的规定,赋石水库属于集中式生活饮用水地表水源地一级保护区,其水质应符合《地表水环境质量标准》中Ⅱ类水质标准,即氨氮浓度应低于 0.5 mg/L, TN 浓度应低于 0.5 mg/L, TP 浓度应低于 0.1 mg/L。在本研究中,白茶的氨氮平均流失浓度为 0.52 mg/L,经济林 TP 平均流失浓度为 0.13 mg/L,虽然超过Ⅱ类水质标准,但符合Ⅲ类水质标准。然而,本研究中 TN 平均流失浓度均超过Ⅲ类水质标准,其中经济林的 TN 平均流失浓度均大于 2.0 mg/L,属于劣Ⅴ类水。这也表明,与磷素污染相比,氮素污染是该地区面源污染的主要类型,在控制该地区面源污染的过程中,应着重控制氮素污染,避免氮素流失。

4 结论

(1) 在研究区不同土地利用方式下,经济林的 TN 平均流失浓度和 TP 平均流失浓度均高于其他立地,分

别为 3.21 mg/L 和 0.13 mg/L。而白茶的氨氮平均流失浓度最大,为 0.52 mg/L。与经济林相比,次生林能够减少 20.19% 的 TN 流失和 46.15% TP 流失。

(2) 降雨因素是影响研究区氮素流失的重要因素,其中降雨量和降雨强度是主要影响因素。

(3) 硝态氮是该地区氮素流失的主要形态而磷素流失的主要形态是溶解态。

(4) 在研究区内,氮素污染比磷素污染更为严重,4 种立地的 TN 流失浓度均超过地表水 II 类水质标准。因此在该地区水源地地面源污染治理过程中,应着重控制氮素流失和氮素污染。

通过研究,表明在长三角地区减少氮素流失是控制面源污染的首要任务,而次生林能够有效减少氮磷流失,这说明优化水源地土地利用方式、建立结构良好的水源涵养林是控制面源污染、减少氮磷流失的重要措施。因此,加强水源地防护林建设是控制水源地面源污染的重要手段。希望通过本研究能够促进水源地面源污染生态治理,改善水源地人居环境。

参考文献:

- [1] Wang R, Wang Q, Dong L, et al. Cleaner agricultural production in drinking-water source areas for the control of non-point source pollution in China[J]. Journal of Environmental Management, 2021,285:112096.
- [2] 孙士咏.长三角低山丘陵区典型水库水源地面源污染发生机制与特征[D].北京:中国林业科学研究院,2020.
- [3] Lian H, Lei Q, Zhang X, et al. Effects of anthropogenic activities on long-term changes of nitrogen budget in a plain river network region: A case study in the Taihu Basin[J]. Science of the Total Environment, 2018,645:1212-1220.
- [4] Yan R, Li L, Gao J. Framework for quantifying rural NPS pollution of a humid lowland catchment in Taihu Basin, Eastern China[J]. Science of the Total Environment, 2019,688:983-993.
- [5] Sun S, Zhang J, Cai C, et al. Coupling of non-point source pollution and soil characteristics covered by *Phyllostachys edulis* stands in hilly water source area[J]. Journal of Environmental Management, 2020,268:110657.
- [6] 王永平,周子柯,滕昊蔚,等.滇南小流域 3 种土地利用方式下土壤侵蚀及养分流失特征[J].水土保持研究, 2021,28(1):11-18.
- [7] 武阳.土地利用变化对喀斯特水体溶解无机碳、总氮和总磷输出的影响:以贵州普定沙湾模拟试验场为例[D].北京:中国地质大学,2021.
- [8] 龚子同.世界土壤资源参比基础(WRB)的创立及其土壤分类[J].土壤学进展,1995,23(5):21-27.
- [9] Wang R, Cai C, Zhang J, et al. Study on phosphorus loss and influencing factors in the water source area[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2022,10(2):324-334.
- [10] 王剑,王肖君,斯圆丽,等.平衡减量施肥和行间配植对白茶园氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2021,35(3):69-76.
- [11] 王荣嘉,高鹏,李成,等.退耕林地麻栎刺槐林壤中流及其磷素流失特征[J].水土保持学报,2019,33(1):9-13,19.
- [12] 王荣嘉,高鹏,李成,等.模拟降雨下麻栎林地表径流和壤中流及氮素流失特征[J].生态学报,2019,39(8):2732-2740.
- [13] 李婷婷,韦彩会,董文斌,等.生草栽培与坡度对桂东北坡地果园地表径流氮磷流失的影响[J].水土保持研究,2021,28(3):59-64,73.
- [14] Wang R, Gao P, Li C, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss in runoff from *Quercus acutissima* Carr. and *Robinia pseudoacacia* L. under simulated rainfall[J]. Soil Science Society of America Journal, 2020,84:833-843.
- [15] 梁爽,陈敏,肖尚斌,等.鄂西长江喀斯特小流域氮磷输出特征[J].长江流域资源与环境,2021,30(10):2471-2481..
- [16] 杨任翔,邱凡,郑佳舜,等.赤红壤植蔗坡地坡面径流及溶解态氮磷流失特征[J].生态学报,2022,42(3):904-913.
- [17] Bennett J M L, Marchuk A, Marchuk S, et al. Towards predicting the soil-specific threshold electrolyte concentration of soil as a reduction in saturated hydraulic conductivity: The role of clay net negative charge[J]. Geoderma, 2019,337:122-131.
- [18] Guedes R S, Melo L C A, Vergütz L, et al. Adsorption and desorption kinetics and phosphorus hysteresis in highly weathered soil by stirred flow chamber experiments[J]. Soil and Tillage Research, 2016,162:46-54.
- [19] Guo S, Zhai L, Liu J, et al. Cross-ridge tillage decreases nitrogen and phosphorus losses from sloping farmlands in southern hilly regions of China[J]. Soil and Tillage Research, 2019,191:48-56.
- [20] Wang L, Zhao X, Gao J, et al. Effects of fertilizer types on nitrogen and phosphorous loss from rice-wheat rotation system in the Taihu Lake region of China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019,285:106605.
- [21] 王月,房云清,纪婧,等.不同降雨强度下旱地农田氮磷流失规律[J].农业资源与环境学报,2019,36(6):814-821.
- [22] 覃自阳,何丙辉,甘凤玲.模拟降雨下重庆喀斯特槽谷区径流氮磷元素流失特征[J].中国农业大学学报,2021,26(5):129-140.
- [23] 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,2019,27(7):1097-1104.