

吕 婷, 廖 敏, 叶照金, 等. 长兴县合溪水库集水区不同土地利用方式下径流氮流失特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1369–1377.
LÜ Ting, LIAO Min, YE Zhao-jin, et al. Characteristics of nitrogen runoff loss under different land uses in a rain collection area of the Hexi Reservoir in Changxing County[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1369–1377.

长兴县合溪水库集水区不同土地利用方式下 径流氮流失特征研究

吕 婷^{1,2}, 廖 敏^{1,2*}, 叶照金^{1,2}, 方至萍^{1,2}, 黄小辉^{1,2}, 张 云³, 施海龙³, 沈 杰³

(1. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 2. 浙江省亚热带土壤与植物营养重点研究实验室, 杭州 310058; 3. 浙江省长兴县环境监测站, 浙江 长兴 313100)

摘 要:从合溪水库集水区合理利用土地资源和保护水库水体质量的角度出发,在集水区选择旱地、水旱轮作地、林地、休闲地、苗木地五种不同土地利用方式,利用田间试验方法研究不同土地利用方式下的径流氮流失特征。结果表明:在自然降雨条件下,五种土地利用方式下土壤氮素流失量和流失浓度表现出明显差异,地表径流液态总氮的流失大小顺序为水旱轮作地($156.92 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)>旱地($114.24 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)>苗木地($35.61 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)>休闲地($3.99 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)>林地($1.59 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),人为耕种强度较大的水旱轮作地和旱地氮流失量较大,而耕种强度较小的休闲地和林地氮流失量较小,说明选择耕种强度较小的土地利用方式可有效削减合溪水库集水区径流氮素流失及其对合溪水库水质的潜在影响。结果还表明:不同试验区径流氮素流失的首要形态均为颗粒态氮,其次为硝态氮,最后为铵态氮;旱地、水旱轮作地、林地、休闲地、苗木地径流年均流失的颗粒态氮占总氮的比例分别是 61.67%、61.42%、75.56%、65.09%和 69.11%,年均流失的硝态氮占总氮的比例分别是 26.21%、28.56%、16.35%、21.30%和 23.20%,年均流失的铵态氮占总氮的比例分别是 8.90%、7.87%、6.92%、11.78%和 4.83%,意味着合溪水库集水区氮素的流失关键在于土壤表层的侵蚀,可见减少土壤表层的侵蚀是控制合溪水库集水区氮素流失和减少其对合溪水库水质负面影响的关键。

关键词:合溪水库;不同土地利用;地表径流;氮素流失

中图分类号:X592 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2017)07-1369-09 doi:10.11654/jaes.2016-1676

Characteristics of nitrogen runoff loss under different land uses in a rain collection area of the Hexi Reservoir in Changxing County

LÜ Ting^{1,2}, LIAO Min^{1,2*}, YE Zhao-jin^{1,2}, FANG Zhi-ping^{1,2}, HUANG Xiao-hui^{1,2}, ZHANG Yun³, SHI Hai-long³, SHEN Jie³

(1. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Subtropical Soil and Plant Nutrition, Hangzhou 310058, China; 3. Changxing Station of Environmental Monitoring, Changxing 313100, China)

Abstract: The aim of the present study was to identify measures to better protect the water quality of the Hexi Reservoir, China, via an improved understanding of the movement of nitrogen from land to water caused by nitrogen runoff due to soil erosion. Nitrogen losses caused by rain and the resulting soil erosion were assessed in field experiments on dry land, cultivated land, woodland, fallow land, and nursery land. Under natural rainfall conditions, the amounts and concentrations of nitrogen losses differed between the five types of land use. The annual losses of total nitrogen in runoff followed the following order: cultivated land ($156.92 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) > dry land ($114.24 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) > nursery land ($35.61 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) > fallow land ($3.99 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) > woodland ($1.59 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$). The nitrogen runoff losses from fallow land and woodland were less than those from cultivated land and dry land, which are both influenced by cultivation. Therefore, to improve the water quality of the

收稿日期: 2016-12-29

作者简介: 吕 婷(1992—),女,山东烟台人,硕士研究生,从事土壤环境化学、水污染治理及农业面源污染研究。E-mail: 21514126@zju.edu.cn

* 通信作者: 廖 敏 E-mail: liaomin@zju.edu.cn

基金项目: 国家公益性行业(农业)专项(201003059); 国家重点研发计划项目(2016YFD0200800)

Project supported: Special Fund for Scientific Research on Public Causes(201003059); The National Key Research Program of China(2016YFD0200800)

Hexi Reservoir, it will be necessary to manage the surrounding land more appropriately. This will effectively reduce the nitrogen runoff losses and their potential impact on the water quality of the Hexi Reservoir. Our results also showed that nitrogen runoff loss is primarily in the form of particulate nitrogen, followed by nitrate nitrogen and ammonium nitrogen under different land uses. The annual runoff losses of particulate nitrogen from upland, cultivated land, woodland, fallow land, and nursery land accounted for about 61.67%, 61.42%, 75.56%, 65.09%, and 69.11%, respectively, of the total annual nitrogen losses. In contrast, the annual runoff losses of nitrate nitrogen accounted for about 26.21%, 28.56%, 16.35%, 21.30%, and 23.20%, respectively, of the total nitrogen losses. The annual runoff loss of ammonium nitrogen accounted for about 8.90%, 7.87%, 6.92%, 11.78%, and 4.83%, respectively, of the total nitrogen losses. Thus, the key to reducing both nitrogen losses and their negative effects on the water quality of the Hexi Reservoir is to decrease surface soil erosion and eliminate the losses of particulate nitrogen. The appropriate modulation of land-use types is recommended to control the source of non-point-source pollution of the Hexi Reservoir.

Keywords: Hexi Reservoir; different land use; overland runoff; nitrogen losses

农业面源污染是引起流域水环境问题的主要原因^[1],控制小流域地表径流引起的氮磷营养元素流失是从源头解决面源污染发生的关键所在^[2]。农业面源污染物质输出过程除了受土壤质地、降雨特征、施肥管理等因子影响,还与土地利用方式密切相关。余进祥等^[3]证实桔园和茶园地表覆盖好、耕作少的土地利用方式总氮基础输出负荷明显低于水旱轮作、旱地、水田等土地利用方式。吕唤春等^[4]对千岛湖流域坡地降雨径流中氮磷浓度变化进行监测和分析,发现不同土地利用方式下降雨径流中总氮浓度变异较大,受人工干扰少的林地总氮流失浓度最低。宋泽芬等^[5]和孟庆华等^[6]的研究也表明,不同土地利用方式可以显著调节系统的水分分配和土壤侵蚀,对生态系统养分的径流输出也有影响,由此产生的面源污染差异更是巨大。因此,根据不同土地利用方式下营养元素流失差异调整农业结构,可以有效遏制农业面源污染的发生发展。

合溪水库是浙江长兴县近40万人的生活饮用水源地,近几年来,合溪水库水体富营养化程度加剧,库区周边约2330 hm²耕地输出的面源污染严重威胁该流域水环境状况。目前,国内外学者大多利用野外或室内模拟人工降雨的方法获得相关参数进行定量研究^[7-11]。然而,由于人工降雨存在局限性,无法长期精

确分析不同季节降雨强度、降雨持续时间和径流量以及不同土地利用方式下氮磷养分输出特征之间的关系,降低了研究的可信度。本研究采用田间试验法,在合溪水库集水区选择旱地、水旱轮作地、林地、休闲地、苗圃地设置径流小区,开展自然降雨条件下集水区不同施肥方式和不同种植模式农地径流氮素的输出形态和流失特征研究,为优化调整合溪水库集水区土地利用结构提供科学依据,以达到减少集水区农业面源污染输出和改善合溪水库水质的目的。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区设在浙江省长兴县环境监测站合溪水库集水区(31°5'30"N, 119°42'22"E),距离水库集水区雨水入库口10 km,集雨面积235 km²,流域范围119°37'—119°49'E。该地区气候属亚热带南缘季风性气候,四季分明,气候温和,雨量充沛,无霜期长,年平均气温15.6℃,全年平均雨日为144 d,多年平均降雨量为1309 mm,主要集中在4—9月。土地利用方式主要为林地和农林地复合利用,采集耕作层(0~20 cm)土壤,不同土地利用方式下土壤理化性质详见表1。

1.2 试验设计与处理

利用自然降雨条件下的定位实验定量研究不同

表1 合溪水库集水区不同土地利用方式下土壤理化性质
Table 1 Soil properties under different land uses in Hexi Reservoir

土地类型	土层深度/cm	pH	有机质/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	硝态氮/mg·kg ⁻¹	铵态氮/mg·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	有效磷/mg·kg ⁻¹
旱地	0~20	6.36	37.20	13.49	47.13	554.05	0.32	101.76
水旱轮作地	0~20	5.87	30.40	11.03	38.52	452.77	0.26	84.16
休闲地	0~20	6.68	0.85	0.84	1.08	12.66	0.51	2.35
林地	0~20	6.08	2.50	2.31	3.17	37.23	0.72	6.92
苗圃地	0~20	6.56	17.23	6.25	21.83	256.62	0.15	47.70

土地利用方式下径流氮素流失特征,在集雨区选择旱地、水旱轮作地、林地、休闲地、苗木地 5 种典型农地建立 10 个径流小区(每种利用方式设立两个平行小区),各小区面积均为 4 m×4 m,小区间起垄四周用塑料薄膜隔开,防止小区间的水相互流动,膜埋深 50~80 cm。每个小区留一排水口,并在排水口处安装一根长 1~3 m、内径 10 cm 的 PVC 管,出水口接一个容量约 1 m³ 的加盖径流池以收集降雨后的径流。每次降雨后立即记录各小区产生的径流量并采集径流样品,样品随即放入冰箱保存以便之后实验室分析。

径流小区定位试验持续一年,即 2015 年 4 月至 2016 年 3 月。试验期间所用肥料为复合肥(总养分≥48%,N-P₂O₅-K₂O=16-16-16)。土地利用方式和管理水平如表 2 所示。

1.3 样品采集及分析

试验期间,在自然降雨结束并产生径流流失的情况下,采集各小区的径流样品并根据径流池中径流的体积计算各小区产生的径流量。采集的地表径流水样静置后分为两部分:一部分用于测定总氮(TN),另一部分水样经 0.45 μm 滤膜过滤后用于测定溶解性氮(DN)、硝态氮和铵态氮,颗粒态氮(PN)利用差减法计算得出。各指标测定方法参考《水和废水监测分析方法》^[12],即总氮、溶解性氮用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定,铵态氮用纳氏试剂光度法测定,硝态氮用紫外分光光度法测定。

1.4 数据分析

各种土地利用方式下不同形态氮的流失通量按下式计算:

$$L_i = \sum_{t=1}^n C_{it} \times Q_{it}$$

式中: L_i 为一场降雨中第 i 种土地利用方式下不同形态氮的流失通量,mg; C_{it} 为第 t 场降雨第 i 种土地利用方式下不同形态氮浓度,mg·L⁻¹; Q_{it} 为第 t 场降雨第 i 种土地利用方式下不同形态氮径流量。

采用 SPSS 17 软件进行数据统计分析,差异显著性分析采用 LSD 法,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 集水区不同土地利用方式下降雨径流特征

表 3 是定位试验期间(2015 年 4 月至 2016 年 3 月)不同土地利用方式下降雨量和径流量分布情况。试验期间合溪水库集水区总降雨量为 1 606.7 mm,降雨多出现在梅雨期和台风季节,7 月份降雨量最大,其次为 6 月份。6—9 月的降雨量为 814.6 mm,占总降雨量的 50%;而 2015 年 12 月至 2016 年 3 月降雨量为 224.1 mm,仅占总降雨量的 13.9%。试验结果显示,不同土地利用方式径流量与降雨量呈显著正相关关系,相关关系分别为:旱地 $R^2=0.763\ 3$;水旱轮作地 $R^2=0.720\ 2$;休闲地 $R^2=0.540\ 9$;林地 $R^2=0.614\ 7$;苗木地 $R^2=0.671\ 7$ 。降雨量是不同土地利用方式地表径流产生的原动力,降雨量越高,径流增加越显著^[13]。

总体来看,试验期内不同土地利用方式产生的径流量差异明显,径流量为林地<休闲地<苗木地<旱地<水旱轮作地,即林地的径流量最少为 360.3 m³·hm⁻²,休闲地和苗木地的径流量高于林地,分别是 900.9、1 031 m³·hm⁻²,旱地和水旱轮作的土地利用方式径流量远远高于林地,分别是林地的 12 倍和 14 倍。分析其原因:水旱轮作地在植稻期间过量灌溉和烤田时大量排水造成径流量增大;旱地以种植应季蔬菜瓜果为主,人为耕作频繁,植被覆盖度低,对降雨的截留作用减弱,径流量增加;没有农事活动的休闲地和林地植被覆盖度较高,增加了对径流传递的阻碍作用^[14],二者径流量减少且差异不大。可见,土地利用方式与降雨产生的径流流失密切相关,是造成不同土地利用方式径流量差异的重要因素。这一结果与 Nie 等^[15]的研究结果一致。

2.2 集水区不同土地利用方式下径流氮素流失特征

图 1 是试验期间合溪水库集水区不同土地利用方式下径流水相各形态氮素浓度随时间变化的动态特征。

表 2 试验小区土地利用方式和管理水平
Table 2 Land use patterns and management levels of study plots

土地类型	利用状况	管理水平	年施 N 量/kg·hm ⁻²
旱地	种植两季蔬菜	5 月和 12 月各施一次肥料	480
水旱轮作地	水稻-油菜轮作	早春基肥,盛夏追肥,翻耕植稻	720
休闲地	荒地,弃耕	无化肥投入,无农事活动	0
林地	人工林	无人为干扰,无化肥投入	0
苗木地	每公顷树苗 400 棵	6 月和 9 月撒施复合肥,落叶还田	200

表3 合溪水库集水区不同土地利用方式下降雨径流特征

Table 3 Characteristics of rainfall and runoff under different land uses in Hexi Reservoir

时间		降雨量/mm	径流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$				
年	月		旱地	水旱轮作地	休闲地	林地	苗木地
2015	4	156.4	243.952 3	488.675 6	16.523 2	16.544 2	26.088 2
	5	159.8	614.000 3	783.167 8	135.836 2	36.607 2	94.061 8
	6	243.3	700.129 0	822.582 9	89.038 5	40.594 0	231.321 4
	7	259.9	1 049.487 0	955.321 7	405.170 2	131.957 4	341.099 4
	8	118.4	157.198 1	311.084 4	52.920 4	28.519 6	61.708 4
	9	193	732.288 9	519.253 0	155.846 7	76.949 2	143.770 8
	10	93.7	161.514 9	409.233 5	5.381 7	3.695 8	7.364 6
	11	158.1	184.735 3	135.534 7	3.110 8	4.421 8	6.764 7
	12	51.1	94.055 8	100.466 5	2.338 4	2.338 4	2.387 9
	1	90.8	104.256 8	164.697 8	23.560 8	11.789 4	45.797 2
	2	28.5	29.797 5	51.637 9	5.386 2	2.479 4	12.398 4
	3	53.7	235.585 7	279.785 5	5.878 2	4.420 3	58.786 6
降雨量-径流相关性分析			0.763 3**	0.720 2**	0.540 9*	0.614 7*	0.671 7*

注:* 相关性显著($P<0.05$), ** 相关性极显著($P<0.01$)。

2.2.1 径流总氮流失浓度动态特征

不同土地利用方式地表径流水相总氮浓度的动态变化特征既表现出相似性,也存在显著差异(图1a)。水旱轮作地、旱地、苗木地、休闲地和林地径流小区的总氮流失平均浓度分别为 (2.60 ± 1.13) 、 (2.21 ± 0.99) 、 (2.88 ± 0.93) 、 (0.37 ± 0.11) 、 $(0.36 \pm 0.12) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。水旱轮作地、苗木地和旱地径流水样中总氮浓度波动随时间的变化最为剧烈,波动范围分别是 $0.90 \sim 4.34$ 、 $1.80 \sim 4.14$ 、 $1.13 \sim 3.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;休闲地、林地径流水样中总氮浓度波动随时间的变化表现相对平缓,波动区间分别为 $0.22 \sim 0.52$ 、 $0.17 \sim 0.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。径流水样中总氮流失平均浓度苗木地最大,其次是水旱轮作地、旱地和休闲地,林地最小,休闲地和林地差异不显著。水旱轮作地总氮流失浓度在6月达到峰值 $3.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,10—12月总氮流失浓度从 $0.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐步上升到 $4.13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。形成这一变化特征的原因可能是:6—9月降雨频率高、雨量大,苗木地、水旱轮作地和旱地在此期间施用了不同数量的复合肥,短时间内不能被植物吸收导致大量养分残留在土壤表面,从而更容易随降雨径流流失,水体总氮平均浓度升高。可见,流域水体总氮浓度的高低受降雨和施肥叠加效应的影响,盛夏追肥期逢雨季,土壤表面氮磷严重流失,增加水体污染负荷,与郭泽慧等^[13]的研究一致。

2.2.2 径流颗粒态氮浓度动态特征

径流水相中的氮素主要以溶解态氮和颗粒态氮两种形态输出,由图1b可知,颗粒态氮的浓度随时间

变化趋势与总氮浓度变化趋势相似。苗木地颗粒态氮平均浓度最高($1.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),其次为水旱轮作地($1.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、旱地($1.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),林地和休闲地相差不大,平均浓度分别为 0.28 、 $0.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。旱地、水旱轮作地、苗木地、休闲地、林地颗粒态氮径流流失浓度最大值分别出现在5、6、7、7、12月,分别为 2.61 、 2.77 、 3.35 、 0.38 、 $0.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。旱地、水旱轮作地和苗木地小区径流颗粒态氮浓度随时间变化波动剧烈,三者全年波动范围分别是 $0.60 \sim 2.61$ 、 $0.53 \sim 2.77$ 、 $0.20 \sim 3.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。除流失峰值外,休闲地和林地径流颗粒态氮浓度变化幅度较小,且径流颗粒态氮浓度都处于较低水平,两种土地利用方式下小区径流颗粒态氮浓度波动范围分别是 $0.09 \sim 0.38$ 、 $0.08 \sim 0.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。旱地、水旱轮作地和苗木地土地利用方式,径流颗粒态氮流失浓度是休闲地和林地的 $4.9 \sim 8.3$ 倍。结合表1和表3分析可知,不同土地利用方式颗粒态氮流失量主要集中在6月和7月。这是因为颗粒态氮的流失以泥沙为载体,6月和7月降雨量均超过 240 mm ,5种不同土地利用方式产流量也较其他月份高,泥沙侵蚀带来的颗粒态氮流失随之增多。

同时,还可发现不同处理的小区中径流颗粒态氮浓度均与径流总氮浓度接近,旱地、水旱轮作地、休闲地、林地和苗木地径流中颗粒态氮分别占总氮的 61.67% 、 61.42% 、 65.09% 、 75.56% 和 69.11% 。这说明在降雨时,雨水与土壤表层相互作用产生的径流中只有一小部分为溶解态氮,氮主要富集在土壤细颗粒中

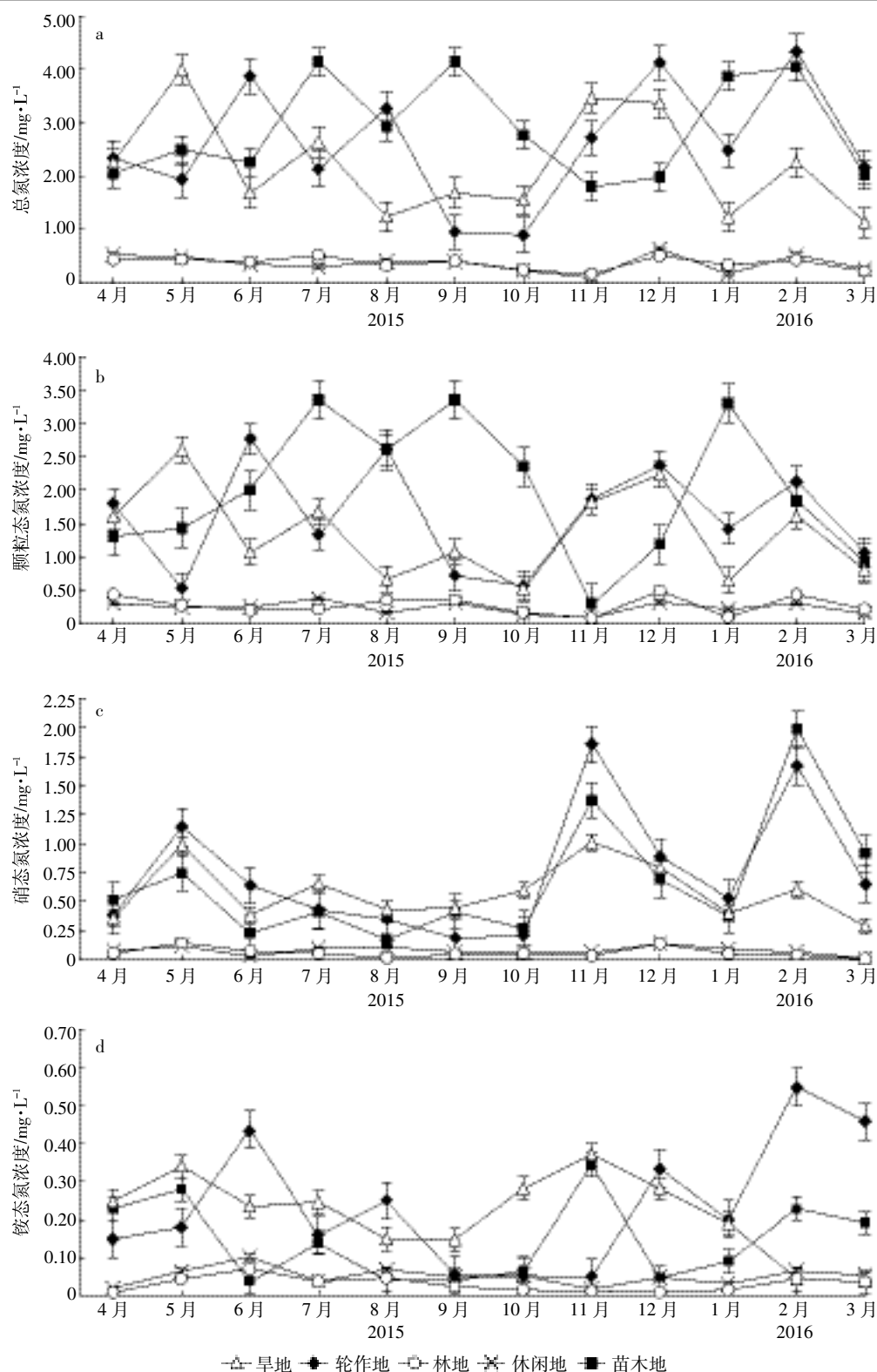


图1 合溪水库集水区不同土地利用方式下各形态氮素浓度动态变化

Figure 1 Dynamic change of various nitrogen concentration under different land uses in Hexi Reservoir

随径流输出^[16]。因此,选择适当的土地利用方式和管理模式有助于减少随地表径流流失的营养元素,降低地表水的面源污染风险。

2.2.3 径流硝态氮浓度动态特征

不同土地利用方式下小区的径流水样中硝态氮浓度动态特征如图 1c 所示。旱地和水旱轮作地小区

径流硝态氮浓度在 11 月达到峰值,分别为 1.01、1.85 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;休闲地、林地、苗木地小区硝态氮径流失浓度峰值出现在 12、5、2 月,分别为 0.14、0.14、1.98 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。和总氮浓度变化特征一样,旱地、水旱轮作地和苗木地径流水相中硝态氮浓度随时间变化幅度相对较大,三个小区水样硝态氮浓度波动区间和平均值分别是 0.29~1.01、0.38~1.85、0.17~1.98 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 (0.58 ± 0.24) 、 (0.74 ± 0.55) 、 (0.67 ± 0.54) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;休闲地和林地径流水相中硝态氮浓度随时间的变化相对平稳,波动区间和平均值分别是 0.01~0.14、0.01~0.14 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 (0.08 ± 0.04) 、 (0.06 ± 0.04) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。旱地、水旱轮作地和苗木地三种土地利用方式径流中硝态氮浓度随时间的变化趋势都是先升高,于 5 月达到相对峰值,之后降低,并于 12 月和 2 月达到另外二个相对峰值,该变化特征的形成原因与硝态氮本身的性质有关,并受降水、灌溉、施肥等因素影响,硝态氮不易被土壤胶体吸附,容易发生淋失。旱地 5 月、苗木地 12 月施入的氮肥是造成硝态氮浓度达到相对峰值的主要原因,冬季降雨量少,对硝态氮稀释作用减小,其浓度升高。另外,5 月和 12 月试验小区进行翻耕、整地,农事活动为表层土壤带来丰富的氧气及微生物活性的释放,氮素发生硝化作用形成硝态氮,遇降雨随径流流失^[7]。年均流失的硝态氮占总氮的比例(表 4)分别是 26.21%、

28.56%、16.35%、21.30%和 23.20%,说明硝态氮是氮素流失的第二主要形式。休闲地和林地径流中硝态氮浓度全年均处于较低状态,且显著低于旱地、水旱轮作地和苗木地,前二者分别为后三者的 14%、7%和 7%,进一步证明硝态氮的流失与土地利用方式和耕作模式密切相关。因此,合理的调整土地利用结构和优化施肥方案是治理合溪水库集水区氮污染问题的有效手段。

2.2.4 径流铵态氮浓度动态特征

图 1d 显示,在持续 1 年的径流小区试验期间,旱地、水旱轮作地、休闲地、林地和苗木地 5 种不同土地利用方式下径流铵态氮浓度波动区间和平均值分别是 0.04~0.34、0.01~0.55、0.02~0.10、0.01~0、0.02~0.34 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 (0.21 ± 0.11) 、 (0.23 ± 0.12) 、 (0.05 ± 0.02) 、 (0.03 ± 0.02) 、 (0.14 ± 0.11) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。铵态氮浓度变化规律不明显,但径流中铵态氮流失浓度都在 5—8 月和 11—2 月处于较高水平,其他月份保持较低水平。林地径流铵态氮流失浓度最小,仅为休闲地的 59.42%;苗木地相对于旱地和水旱轮作地,其铵态氮径流流失浓度分别降低了 35.25%和 40.11%。形成上述变化特征的原因除了与降雨量、土地利用方式以及表层植被覆盖度有关外,还可能跟铵态氮特性有关。研究表明,铵态氮移动性小,容易被土壤胶体所

表 4 合溪水库集水区不同土地利用方式下年均径流氮流失情况
Table 4 Annul nitrogen runoff under different land uses in Hexi Reservoir

项目	土地类型	径流氮素形态				
		TN	PN	DN	NH_4^+-N	NO_3^--N
各形态氮素流通过量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$	旱地	114.24b	70.45b	43.81b	7.17a	29.95b
	水旱轮作地	156.92a	96.37a	60.55a	9.35a	44.82a
	休闲地	3.99d	2.59d	1.39d	0.17c	0.85d
	林地	1.59e	1.20e	0.39e	0.06c	0.26d
	苗木地	35.61c	24.61c	10.74c	1.42c	8.26c
各形态氮素平均浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	旱地	2.21	1.36	0.84	0.21	0.58
	水旱轮作地	2.60	1.60	1.00	0.23	0.74
	休闲地	0.37	0.24	0.13	0.05	0.08
	林地	0.36	0.28	0.09	0.03	0.06
	苗木地	2.87	1.99	0.89	0.14	0.67
各形态氮素占全氮比例/%	旱地	100.00	61.67	38.33	8.90	26.21
	水旱轮作地	100.00	61.42	38.58	7.87	28.56
	休闲地	100.00	65.09	34.91	11.78	21.30
	林地	100.00	75.56	24.44	6.92	16.35
	苗木地	100.00	69.11	30.89	4.83	23.20

注:小写字母表示同列数据的差异显著($P<0.05$)。

Note: Lowercase letters indicate the significant difference of the same column data($P<0.05$).

吸附^[18],与硝态氮相比淋失浓度降低较慢,但当土壤对其吸附达到饱和时,同样会在雨水中释放并随径流而流失^[19-20],农田氮素淋溶流失以可溶性硝态氮为主,亚硝态氮次之,铵态氮只占很小比例^[21]。本研究得到的结果与前人一致。

2.3 不同土地利用方式下单位面积径流年均不同形态氮流失通量及其组成特征

2.3.1 单位面积径流年均不同形态氮流失通量

表 4 结果显示,不同土地利用方式下单位面积径流年均氮流失通量与径流氮素流失浓度和径流量成正比。旱地、水旱轮作地、休闲地、林地、苗木地年总氮径流流失通量分别为 114.24、156.92、3.99、1.59、35.61 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 颗粒态氮径流流失通量分别为 70.45、96.37、2.59、1.20、24.61 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 溶解性氮径流流失通量分别为 43.81、60.55、1.39、0.39、10.74 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。不同土地利用方式下各形态氮素年均径流流失通量之间存在显著差异,由大到小均为:水旱轮作地>旱地>苗木地>休闲地>林地。旱地、苗木地、休闲地和林地单位面积年均径流总氮流失通量分别是水旱轮作地的 72.80%、22.70%、2.54%、1.01%;年均径流溶解性氮流失通量分别是水旱轮作地的 72.36%、17.74%、2.30%、0.64%;年均径流颗粒态氮流失通量分别是水旱轮作地的 73.10%、25.54%、2.69%、1.25%。林地、休闲地、苗木地径流氮素流失通量都小于旱地和水旱轮作地,可见在降雨特征相同的条件下,土地利用方式对径流氮素迁移及输出通量具有较大影响。进一步分析可知,水旱轮作地因灌溉、排水管理措施产生大量径流流失,旱地受人为耕作影响,二者各形态氮年径流流失量最大,浓度变化范围最广。苗木地地表虽有一定程度植被覆盖,但不合理的施肥方式加之短期内遭受大雨影响容易造成大量氮素流失。休闲地和林地因几乎没有人为扰动,地表植被覆盖率高,土壤涵水能力强,土壤表层氮素流失量相对较少。因此,地表径流氮流失大小不仅和土地利用类型相关,更受农事活动、施肥方式、地表植被覆盖等因素的影响。为了最大程度削减径流氮素流失,可进一步优化种植结构,旱地、水旱轮作地向苗木地、林地等利用方式转变,通过优化施肥方案、调整土地利用方式,将有效削减合溪水库集水区农地氮素的面源输出,最大化地减少合溪水库集水区农业面源污染对水库水质的潜在影响。

2.3.2 年均径流流失氮素形态组成特征

图 2 是 5 种土地利用方式不同形态氮素年均流失通量占年均总氮径流流失通量比例特征。旱地、水

旱轮作地、休闲地、林地、苗木地年均溶解态氮径流流失量占总氮的百分比分别为 38.33%、38.58%、34.91%、24.44%和 30.89%,年均颗粒态氮径流流失量占总氮的比例分别为 61.67%、61.42%、65.09%、75.56%和 69.11%。可见不同土地利用方式径流氮流失的主要形态为颗粒态氮,径流流失中的可溶性部分又以硝态氮为主要形式输出。年均流失的硝态氮占总氮的比例分别为 26.21%、28.56%、16.35%、21.30%和 23.20%,年均流失的铵态氮流失占总氮的比例分别为 8.90%、7.87%、6.92%、11.78%和 4.83%。形成该特征的原因是:铵态氮和硝态氮主要存在于液相中和吸附于土壤胶体表面,径流量大小以及径流在传递过程中与土壤表层相互作用的强度决定了二者流失量的大小,这种相互作用的结果加速了土壤溶液中氮向径流释放^[22]。

3 结论

(1)合溪水库集水区降雨量与各小区径流量呈显著正相关,与水旱轮作地相比,苗木地、休闲地和林地试验小区径流量分别减少了 79.46%、82.06%和

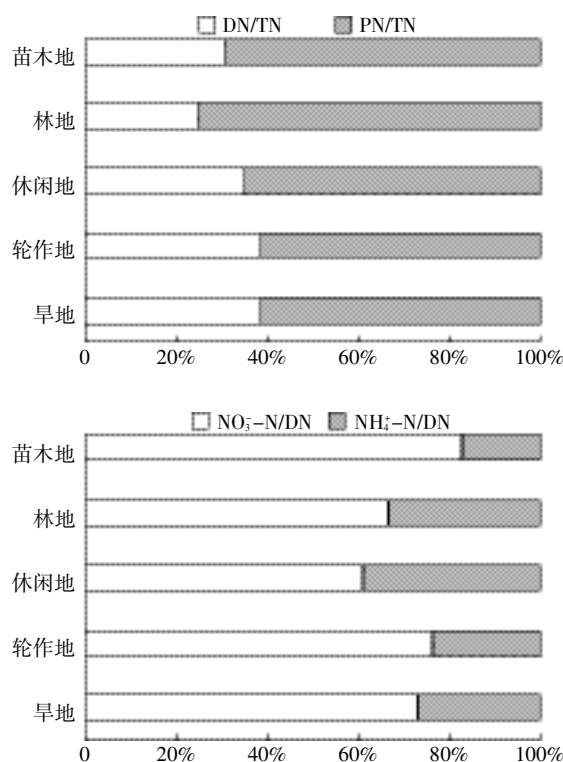


图 2 合溪水库集水区不同土地利用方式下年均氮素径流流失组成特征

Figure 2 Composition of nitrogen runoff under different land uses in Hexi Reservoir

92.82%,说明土地利用方式与降雨产生的径流流失密切相关,合理调整土地利用结构可有效削减径流携带的养分流失。

(2)不同土地利用方式地表径流水相总氮流失主要集中在多雨季节的6—9月,受降雨和施肥叠加效应的影响,总氮流失量占全年流失量的50%以上,因而翻耕、施肥等农事活动要尽量避开雨期,以减少土壤氮的流失。

(3)合溪水库集水区不同土地利用方式下地表径流年总氮流失通量在水旱轮作地最高,林地最低,仅为水旱轮作地的1.01%。与水旱轮作地、旱地等土地利用方式相比,林地在减少径流氮素流失方面具有明显的优势。

(4)5种不同土地利用方式年均颗粒态氮径流流失占总氮的比例在61.42%~75.56%之间,是氮素流失的主要形式,说明选择减少地表侵蚀、削减径流泥沙输出的土地利用方式是降低合溪水库集水面源污染风险的有效措施。

参考文献:

- [1] 吴雅丽, 许海, 杨桂军, 等. 太湖水体氮素污染状况研究进展[J]. 湖泊科学, 2014, 26(1): 19–28.
WU Ya-li, XU Hai, YANG Gui-jun, et al. Progress in nitrogen pollution research in Lake Taihu[J]. *J Lake Sci*, 2014, 26(1): 19–28.
- [2] 陈成龙, 高明, 倪九派, 等. 三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1707–1716.
CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, et al. Nitrogen losses under the action of different land use types of small catchment in Three Gorges Region[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5): 1707–1716.
- [3] 余进祥, 赵小敏, 吕珩, 等. 鄱阳湖流域不同农业利用方式下的氮磷输出特征[J]. 江西农业大学学报, 2010, 32(2): 394–402.
YU Jin-xiang, ZHAO Xiao-min, LÜ Bei, et al. Transportation characteristics of nitrogen and phosphorous in various land-use in the Poyang Lake watershed[J]. *Acta Agricultural Universitatis Jiangxisis*, 2010, 32(2): 394–402.
- [4] 吕唤春, 薛生国, 方志发, 等. 千岛湖流域不同土地利用方式对氮和磷流失的影响[J]. 中国地质, 2004, 31(增刊): 112–117.
LÜ Huan-chun, XUE Sheng-guo, FANG Zhi-fa, et al. Effects of different land use patterns on nitrogen and phosphorus losses in Qiandao Lake Basin[J]. *Geology in China*, 2004, 31(Suppl): 112–117.
- [5] 宋泽芬, 王克勤, 杨云华, 等. 澄江尖山河小流域不同土地利用类型面源污染输出特征[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 98–101.
SONG Ze-fen, WANG Ke-qin, YANG Yun-hua, et al. Characteristics of non-point source pollution output of different utilization pattern in small watersheds in Jianshan River, Chengjiang[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 98–101.
- [6] 孟庆华, 杨林章. 三峡库区不同土地利用方式的养分流失研究[J]. 生态学报, 2000, 20(6): 1028–1033.
MENG Qing-hua, YANG Lin-zhang. Nutrient losses in different land use types in the Three Gorge Reservoir area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(6): 1028–1033.
- [7] 郭鸿鹏, 朱静雅, 杨印生. 农业非点源污染防治技术的研究现状及进展[J]. 农业工程学报, 2008, 41(3): 301–310.
GUO Hong-peng, ZHU Jing-ya, YANG Yin-sheng. Research status and development of technologies for controlling agricultural non-point source pollution[J]. *Transaction of the Chinese of Agricultural Engineering*, 2008, 41(3): 301–310.
- [8] 陈志良, 程炯, 刘平, 等. 暴雨径流对流域不同土地利用土壤氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 30–34.
CHEN Zhi-liang, CHENG Jiong, LIU Ping, et al. An experiment on influence of storm on nitrogen loss and phosphorus loss under different land use in river basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(5): 30–34.
- [9] Sharpley A N, Withers P J A. The environmentally-sound management of agricultural phosphorus[J]. *Fertilizer Research*, 1994, 39(2): 133–146.
- [10] 梁涛, 王红萍, 张秀梅, 等. 官厅水库周边不同土地利用方式下氮、磷非点源污染模拟研究[J]. 环境科学学报, 2005, 25(4): 483–490.
LIANG Tao, WANG Hong-ping, ZHANG Xiu-mei, et al. Simulation study of non-point source pollution under different landuse in Guanting Reservoir watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(4): 483–490.
- [11] Walter M T, Parlange J Y, Walter M F. Modeling pollutant release from a surface source during rainfall runoff[J]. *Environ Qual*, 2001, 30: 151–159.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [13] 郭泽慧, 刘洋, 黄懿梅, 等. 降雨和施肥对秦岭北麓余家河水质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 158–166.
GUO Ze-hui, LIU Yang, HUANG Yi-mei, et al. Effect of rainfall and fertilization on water quality of the Yujia River watershed in Northern Qinling mountains[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2017, 36(1): 158–166.
- [14] 张兴昌, 刘国斌, 付会芳. 不同植被覆盖度对流域氮素径流流失的影响[J]. 环境科学, 2000, 21(6): 16–19.
ZHANG Xing-chang, LIU Guo-bin, FU Hui-fang. Soil nitrogen losses of catchment by water erosion as affected by vegetation coverage[J]. *Environmental Science*, 2000, 21(6): 16–19.
- [15] Nie W M, Yuan Y P, Kepner W, et al. Assessing impacts of land use and land cover changes on hydrology for the upper San Pedro watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 407(1/2/3/4): 105–114.
- [16] 袁兴程, 钱新, 庞宗强, 等. 不同土地利用方式土壤表层氮、磷流失特征研究[J]. 环境化学, 2011, 30(9): 1657–1662.
YUAN Xing-cheng, QIAN Xin, PANG Zong-qiang, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss in different land use types[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(9): 1657–1662.

- [17] 张福珠,熊先哲,戴同顺,等.应用 ^{15}N 研究土壤-植物系统中氮素淋失动态[J].环境科学,1984,5(1):21-24.
ZHANG Fu-zhu, XIONG Xian-zhe, DAI Tong-shun, et al. Application of ^{15}N to study the dynamics of nitrogen leaching in soil plant system[J]. *Environmental Chemistry*, 1984, 5(1):21-24.
- [18] 高 超,朱继业,朱建国,等.不同土地利用方式下的地表径流磷输出及季节性分布特征[J].环境科学学报,2005,25(11):1543-1549.
GAO Chao, ZHU Ji-ye, ZHU Jian-guo, et al. Phosphorus exports via overland runoff under different land use and their seasonal pattern[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(11):1543-1549.
- [19] 司友斌,王慎强,陈怀满.农田氮、磷的流失与水体富营养化[J].土壤,2000,32(4):188-193.
SI You-bin, WANG Shen-qiang, CHEN Huai-man. The loss of nitrogen and phosphorus in farmland and eutrophication of water body[J]. *Soil*, 2000, 32(4):188-193.
- [20] 石孝军.水旱轮作体系中的养分循环特征[D].北京:中国农业大学,2003.
SHI Xiao-jun. Characteristics of nutrient cycling in paddy upland rotation system[D]. Beijing: China Agricultural University, 2003.
- [21] 王 伟,于兴修,刘 航,等.农田土壤氮矿化研究进展[J].中国水土保持,2016(10):67-71.
WANG Wei, YU Xing-xiu, LIU Hang, et al. Research progress on soil nitrogen mineralization in farmland[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2016(10):67-71.
- [22] 李长阁.化学氮素在旱地土壤中的迁移转化研究[D].北京:首都师范大学,2006.
LI Chang-ge. Study on the migration and transformation of chemical nitrogen in dryland soil[D]. Beijing: Capital Normal University, 2006.