

哈尼梯田生态系统地表水不同形态氮含量时空分布特征

闵惠琳, 宋维峰

(西南林业大学生态与水土保持学院, 昆明 650224)

摘要: 为探讨哈尼梯田生态系统天人合一的水分和营养元素的利用模式, 揭示哈尼梯田生态系统氮素时空变化规律, 明确土地利用对氮浓度的影响, 为哈尼梯田的水环境保护和可持续发展提供科学依据。以元阳县全福庄小流域为研究对象, 应用 Kriging 空间插值法分析了该系统地表水氮素的时空分布特征。结果表明: (1) 除 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度在夏季和冬季呈强变异外, 其他 N 浓度在不同季节的变异系数均小于 100%, 表现为中等程度变异。 (2) 梯田中下部 TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度变幅都较大, 分别为 0.103~0.849, 0.010~0.143, 0.052~0.446 mg/L, 森林地表水中 TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的变幅都相对较小, 分别为 0.108~0.471, 0.003~0.102, 0.058~0.164 mg/L。 (3) TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 各季节的块金系数均小于 50%, 各季节均有较强的空间自相关性。TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 各季节的变程均在 1 000 m 以内, 表明各指标各个季节分别在不同尺度范围内分布连续, 存在空间自相关性。 (4) 通过 Kriging 插值法得知, 不同季节 TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 地表水浓度从整体上为村庄 > 梯田 > 河流 > 森林的分布规律。

关键词: 哈尼梯田; 四素同构; 氮素; 时空分布; 地统计分析

中图分类号: X832; X523

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0235-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.036

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Nitrogen Content in Different Forms in the Surface Water of Hani Terraces

MIN Huilin, SONG Weifeng

(College of Ecology and Soil & Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224)

Abstract: To explore the unity use patterns of water and nutrients in Hani terrace, reveal the spatial and temporal variation of nitrogen, clarify the impact of land use on nitrogen concentration, and provide scientific basis for water environment protection and sustainable development, we used QuanFu zhuang watershed as the research object, analyzed the characteristics of spatial and temporal distribution of surface water nitrogen. The research showed that (1) Except for the strong variation of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration in summer and winter, the coefficients of variation of other N concentrations in different seasons were less than 100%, and showed a moderate variation. (2) The variations of the concentration of TN, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration in the lower part of the terraced fields were (0.103~0.849, 0.010~0.143, 0.052~0.446 mg/L) relatively large, and the variations of the concentration of TN, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration in forest surface water were (0.108~0.471, 0.003~0.102, 0.058~0.164 mg/L) relatively small. (3) The nugget coefficients of TN, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ were less than 50% in each season, and showed a strong spatial correlation in each season. The variation ranges of TN, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ were all within 1 000 m in each season, indicating that the variation was distributed continuously in different scales in each season and there was spatial autocorrelation. (4) Through Kriging interpolation, the overall TN, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ concentration in surface water of different seasons ranged as village > woodland > terrace > rivers.

Keywords: Hani terrace; four-in-one ecological elements; nitrogen; temporal and spatial distribution; geostatistical analysis

氮(N)是陆地及海洋生物不可缺少的生命元素, 是生命支持系统不可替代的主成分, 是生物圈物质与

能量循环的重要组成部分, 也是促进农业持续发展的根本要素。大量氮素通过降雨和地表径流等水文过

程输入水体,从而引起地表水水生态环境恶化及水体富营养化问题的出现,同时也浪费了大量的养分资源^[1]。我国作为一个农业生产大国,农业环境形势极其严峻,从第一次全国污染源调查的结果看出,我国高达 159.78 万 t/a 的总氮(TN)流失量是由于种植业的发展所引起的。

对不同土地利用方式下养分流失和土壤侵蚀特征进行定量研究的常用方法是利用人工控制下的标准径流小区进行试验^[2]。目前我国学者已针对径流小区进行了大量的试验工作,但大多采用的是人工模拟降雨的研究方法,针对天然降雨条件下开展的研究较少。单保庆等^[3]利用人工模拟降雨法研究了巢湖地区氮、磷的输出特征及机理;黄满湘等^[4]利用此类方法研究了北京郊区氮、磷的输出特征和机理;王帅兵等^[5]在天然降雨条件下研究了等高反坡阶对养分流失的影响。关于氮素的迁移,国内外主要是从面源污染、水体富营养化角度来研究的,并且主要集中在地下水和湖泊方面,对地表径流的研究主要集中在旱田、坡耕地土壤侵蚀和氮磷流失方面,对水田氮素流失及空间分布的研究亟待开展。朱继业等^[6]研究了太湖流域典型小流域不同农地利用方式下自然降雨过程引起的地表径流氮流失特征;郑海金等^[7]对鄱阳湖水系的红壤坡耕地地表径流和壤中流的氮流失特征进行比较研究。目前,应用空间插值方法对土壤养分的空间变异性研究较多,高玉蓉等^[8]基于克立格最优内插法对稻田土壤养分的空间变异性开展了相关研究;崔旭辉等^[9]对南沟小流域土壤养分空间分异特征进行了研究。应用空间插值方法对水体的研究较少,并且主要集中在对地下水和湖泊的研究,闫佰忠等^[10]采用空间插值法研究了吉林市城区土地利用对地下水污染空间分布的影响;刘瑞民等^[11]对太湖水质中部分参数的空间变异性进行了研究。目前利用空间插值方法对元阳哈尼梯田地表水氮素空间分布的研究未见报道,且鲜有人对水体氮素进行长期、连续性及系统的观测研究,龚清莲等^[12]根据长江宜宾段监测断面 3 年的水质监测数据对水质时空分布特性进行了研究。

哈尼梯田特殊的“四素同构”生态系统的顶端是森林,中部是村庄,下部是梯田和河流,顶端的森林为哈尼梯田湿地系统和河流提供了充足的水源保证,中部的村庄其饮用水和生活用水主要来源于上方的森林,位于森林和村庄下方的梯田,发挥了粮食生产的功能,并且水稻生长所需的营养元素主要来源于森林内的地表径流,而不是化肥,水历经梯田后最终汇入下方河流中。因此,本研究为探讨哈尼梯田“四素同构”系统天人合一的水分和营养元素的利用模式,应

用空间插值法分析了该系统地表水氮素的空间分布特征,揭示哈尼梯田生态系统氮素时空变化规律,为哈尼梯田的水环境保护、确保水质安全和可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

元阳县(102°27′—103°13′ N, 22°49′—23°19′ E)地处云南省红河州的西南部,总面积 2 215.46 km²,其境内的水系主要有红河、藤条江和金子河。该县地处哈尼梯田的核心区,境内梯田面积为 1.32 × 10⁴ hm²,海拔 700~1 800 m。研究区位于麻栗寨河流域上游的全福庄小流域,是哈尼梯田“四素同构”生态系统的典型代表,全福庄小流域上部是森林、次上部是村庄、中部是梯田、下部是河流(图 1),面积 79.9 hm²,海拔 1 720~2 073 m,气候属亚热带山地季风气候,年均相对湿度为 85%,年雾期 180 d。年降水量 1 397.6 mm,降水主要集中在 5—10 月,占全年降水量的 78%。年均气温 20.5 ℃,极端最高气温为 37.5 ℃,极端最低气温为 0.6 ℃,年日照时间为 1 820.8 h,年蒸发量为 1 184.1 mm^[13]。土壤以黄壤、黄棕壤为主,土壤剖面完整,土层厚度 100 cm^[14]。研究区内主要土地利用方式为森林和稻田,森林内主要树种有红木荷(*Schima wallichii*)、桤木(*Alnus cremastogyne* Burk.)、旱冬瓜(*Alnus nepalensis* D. Don)、元江山茶(*Camellia japonica*)、臭牡丹(*Clerodendrum bungei* Steud)、浆果栎(*Quercus coccofera*)等,梯田种植一季稻,品种以绿平谷为主,5 月插秧,10 月成熟,插秧后 2 周内施农家肥,施肥方式以人工施肥和沟渠冲肥为主,稻田不放水,常年有水。

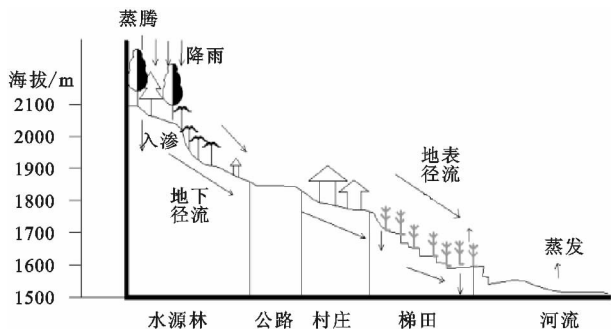


图 1 哈尼梯田“四素同构”生态系统示意

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置及调查

(1)观测场布设。在全福庄小流域上游森林区域内布设 3 类典型森林类型标准观测场,包括 20 m × 20 m 的乔木林标准观测场,10 m × 10 m 的灌木林标准观测场和 10 m × 10 m 的荒草地标准观测场(表 1)。在全福庄小流域上游森林出口处布设卡口站 1 处,卡口站内安装自记雨量计(JDZ05-1,金洋万达,

中国)观测降雨量,利用水位计结合三角形量水堰对小流域内的产流进行观测。

表 1 观测场概况

土地利用类型	主要植物种类	海拔/m	坡度/(°)	坡向	平均胸径/cm	平均树高/m	土壤类型
乔木林地	旱冬瓜 (<i>Alnus nepalensis</i> D. Don)、元江栲 (<i>Castanopsis orthacantha</i>)、红木荷 (<i>Schima wallichii</i>)、桤木 (<i>Alnus cremastogyne</i> Burk.)、元江山茶 (<i>Camellia japonica</i>)	2070	15	东	20	15.0	黄棕壤
灌木林地	臭牡丹 (<i>Clerodendrum bungei</i> Steud)、浆果楸 (<i>Quercus cocCIFera</i>)、叶下株 (<i>Phyllanthus urinaria</i>)	2000	20	东	8	3.5	黄棕壤
荒草地	鳞毛蕨 (<i>Dryopteris filix-mas</i>)、紫茎泽兰 (<i>Eupatorium adenophorum</i>)、沿阶草 (<i>Ophiopogon bodinieri</i>)	1942	25	东	—	0.3	黄棕壤

(2)采样点布设。根据研究区上部是森林、中部是村庄、下部是梯田和河流的垂直结构特点,采用自上而下梯度格局法,根据 GPS 准确定位,均匀布设样点,使得布点与水分迁移方向一致,以确保能准确地反映研究区氮浓度的空间分布及季节变化特征。在上部森林区域按从上至下分别在乔木林样地、灌木林样地、荒草地样地、卡口站、沟渠的径流沿程布设样点,在村庄内沟渠至村庄出口自上而下布设样点,下部梯田区域以海拔梯度为依据,自上而下,将梯田分为上、中、下均匀布设田块样点和梯田沟渠样点,在梯田出口—河流入口及河流内部布设河流样点(图 2)。

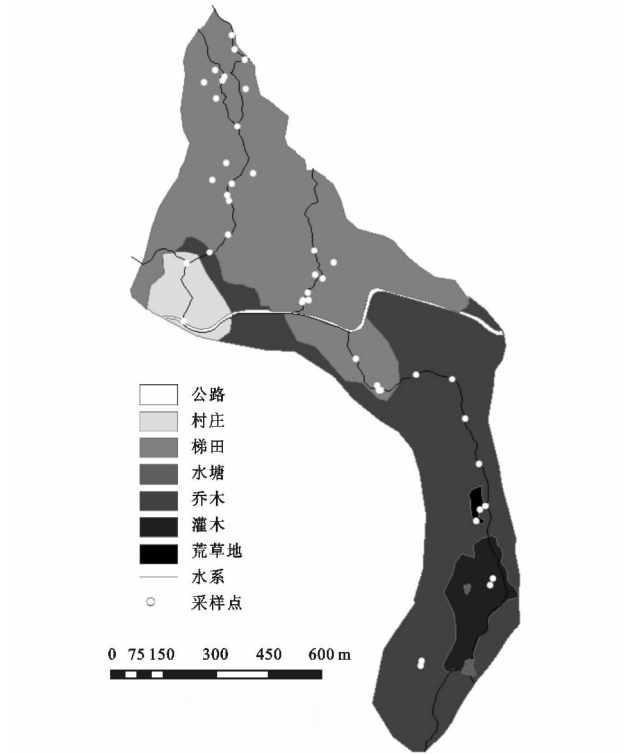


图 2 采样点布设

1.2.2 样品采集与测定 样品采集时间为 2016 年 9 月至 2017 年 10 月(春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9—11 月,冬季为 12—次年 2 月),根据地表水环境质量标准(GB 3838—2002)的要求采集和保存水样,每月 28—31 日)采样 1 次,雨后采样 3 次。采集对象为地表水,由于研究区有常流水,保证了一

年四季不间断采样,各采样点均使用 1% 的 HCl 溶液清洗过的 500 mL 聚乙烯塑料瓶采集样品,在采样点将塑料瓶润洗 2~3 次后,采集水样 2 瓶,其中 1 瓶用浓硫酸调节 pH 至 1~2 用于 TN 和 NH_4^+-N 的测定,保存在 4℃ 低温保温箱中带回实验室测定。测定指标有总氮(TN)、硝态氮(NO_3^--N)和氨态氮(NH_4^+-N)。其中总氮、硝态氮、氨态氮分别采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度计法(HJ 636—2012)、酚二磺酸—分光光度计法(GB 7480—87)纳氏试剂—分光光度计法(HJ 535—2009)进行测定。

1.2.3 数据分析方法

(1)经典统计分析。通过地表径流中 TN、 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 浓度的平均值、标准差和变异系数等研究 N 浓度的平均状况和变异程度,变异系数 $\text{CV} \leq 10\%$ 属弱变异性, $10\% < \text{CV} < 100\%$ 属中等变异性, $\text{CV} \geq 100\%$ 属强变异性。

(2)地统计学分析。通过 Arc GIS 软件采用普通 Kriging 插值方法,分析水中 TN、 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 的空间分布特征。在进行 Kriging 插值之前,先对样本数据进行正态分布检验,若不服从正态分布,则需对数据进行转换,转换方法有对数转换、Box—Cox 转换、logit 转换等。本研究采用的是对数转换,转换后的数据近似服从正态分布,峰度和偏度明显降低。然后计算春、夏、秋和冬季 TN、 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 的变异函数,并进行拟合。Arc GIS10.1 中用来拟合变异曲线图的理论模型主要有球状模型、指数模型、高斯模型、Stable 模型等。本研究通过均方根、平均标准误差等检验,确定的变异函数拟合模型主要是高斯、球状和指数模型,根据块金系数(块金值/基台值)、变程等参数定量分析空间异质性程度,块金系数小于 25% 表示变量有很强的空间自相关性,块金系数在 25%~75% 有中等的空间自相关性,块金系数大于 75% 变量空间自相关性很弱^[15],不适合采用空间插值的方法进行预测。利用 Kriging 插值法,根据已采样点观测值对研究区内未取样点的区域化变量进行最小误差估计,从而得到整个研究区 TN、 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 浓度的空间分布。

2 结果与分析

2.1 氮浓度的统计描述

由表 2 可知,地表径流中,TN 在春季变幅最大,冬季最小,夏季平均值最高,为 0.395 mg/L,冬季平均值最低,为 0.219 mg/L,夏季、春季与秋季、冬季差异性显著。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在夏季变幅和平均值均为最高,平均值为 0.046 mg/L,冬季变幅和平均值均为最小,平均值为 0.030 mg/L,夏季与其他季节差异性显著。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在春季变幅和平均值均为最高,平均值为 0.213 mg/L,秋季平均值最小,为 0.107 mg/L,夏季和秋季与其他季节差异性显著。除 $\text{NO}_3^- - \text{N}$

浓度在夏季和冬季呈强变异外,其他 N 浓度在不同季节的变异系数均小于 100%,表现为中等程度变异。可知 TN 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 相似,两者的均值均为夏季最高,冬季最低,这是由于径流中 TN 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度受降雨的影响显著^[16],研究期内总降水量 1 511.6 mm,其中夏季降雨量占到总降雨量的 43.70%,氮素随降雨进入地表径流。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在春季平均值最高,这可能是由于春季农民开始种植水稻,在施肥的影响下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均值达到最高。研究表明,氮肥和有机肥中大量的氮化物在进入土壤后主要是以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 形式存在^[17]。

表 2 径流氮素浓度的描述性统计分析

指标	样本数	季节	中位数	最小值	最大值	平均值	标准差	标准误	变异系数/%
TN	50	春	0.369	0.176	0.543	0.371a	0.168	0.035	40.16
		夏	0.373	0.271	0.712	0.395a	0.174	0.036	44.83
		秋	0.263	0.150	0.348	0.256b	0.086	0.018	34.00
		冬	0.197	0.128	0.351	0.219b	0.086	0.018	39.01
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	50	春	0.027	0.015	0.083	0.034b	0.023	0.005	71.13
		夏	0.031	0.011	0.216	0.046a	0.058	0.012	127.05
		秋	0.021	0.012	0.088	0.031b	0.026	0.005	83.36
		冬	0.020	0.012	0.118	0.030b	0.031	0.006	104.09
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	50	春	0.216	0.107	0.307	0.213a	0.074	0.015	33.89
		夏	0.082	0.057	0.226	0.094c	0.043	0.009	41.82
		秋	0.102	0.085	0.221	0.107c	0.035	0.007	31.24
		冬	0.146	0.081	0.257	0.155b	0.062	0.013	38.97

注:平均值后标注的不同字母表示显著性差异($p<0.05$)。

2.2 氮浓度动态变化特征

由于研究区上部是森林、次上部是村庄、中部是梯田、下部是河流的垂直结构特点,对不同土地利用类型的地表水氮浓度进行分析。由图 3 可知,TN 浓度变幅最大的是梯田中下部和梯田上部,分别为 0.103~0.849,0.131~0.883 mg/L,村庄次之,森林和河流的 TN 浓度变幅较小。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度变幅最大的是村庄,其变化范围为 0.009~0.416 mg/L,其次为梯田中下部,森林、河流和梯田上部变幅相对较小。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度变幅最大的是梯田中下部,为 0.052~0.446 mg/L,梯田上部、村庄和河流次之,变

幅最小的是森林。综上所述,可以看出梯田中下部 TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度变幅都较大,森林 TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的变幅都相对较小,这与梯田在农忙期受到施肥等人为影响有关,并且村庄的生活污水、牲畜粪便等对梯田中下部有直接影响,而森林受人为活动影响少。TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均浓度分别是 0.313,0.035,0.142 mg/L, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的平均浓度占 TN 的比重为 11.2%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的平均浓度占 TN 的比重为 45.4%,这是由于研究区梯田所占面积大,并且梯田长期处于淹水状态,硝化反应弱,因此 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度低。

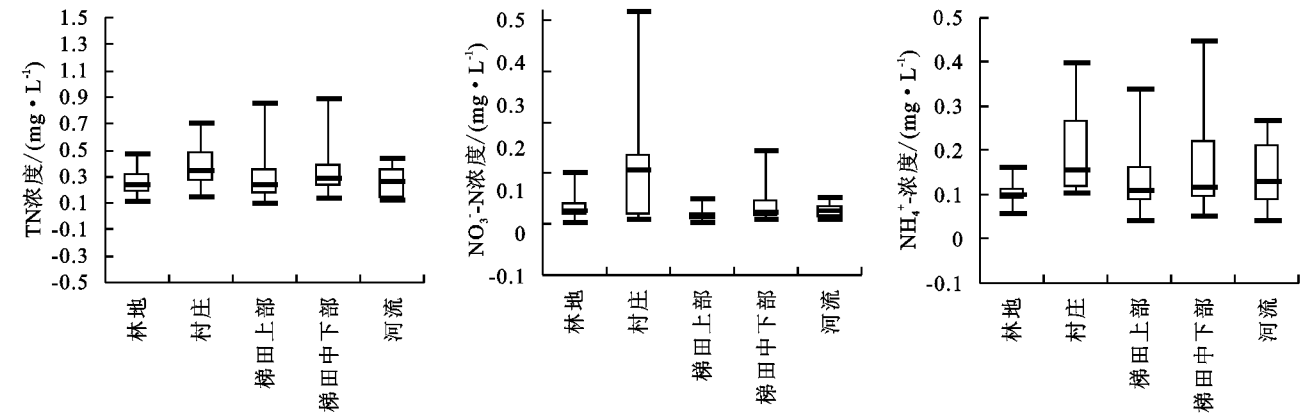


图 3 不同土地利用类型 N 浓度的箱体分布

2.3 氮浓度空间变异性

通过 Arc GIS 软件得到各季节 N 浓度的半方差函数,再将其进行拟合,得到的理论变异函数模型的参数见表 3。块金值表示随机部分的空间异质性,基台值表示系统内总的变异,块金系数(块金值/基台值)表示空间异质性程度,随机部分引起的空间异质性占系统总变异的比例,块金系数小,说明由空间自相关部分引起的空间变异程度较大,块金系数大,说明由随机部分引起的空间变异程度较大。由表 3 可知,除 TN 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$

和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在秋季的块金系数及 TN 在夏季的块金系数小于 50%,表现出中等的空间自相关性外,其他各季节的块金系数均小于 25%,表现出很强的空间自相关性。变程表示具有相似性质斑块的空间连续性的范围,变程以内的变量具有空间相关性或空间依赖性,变程以外的则不存在空间自相关性。从变程来看, TN 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在各季节的变程均在 1 000 m 以内,表明各指标各个季节分别在不同尺度范围内分布连续,存在空间自相关性。

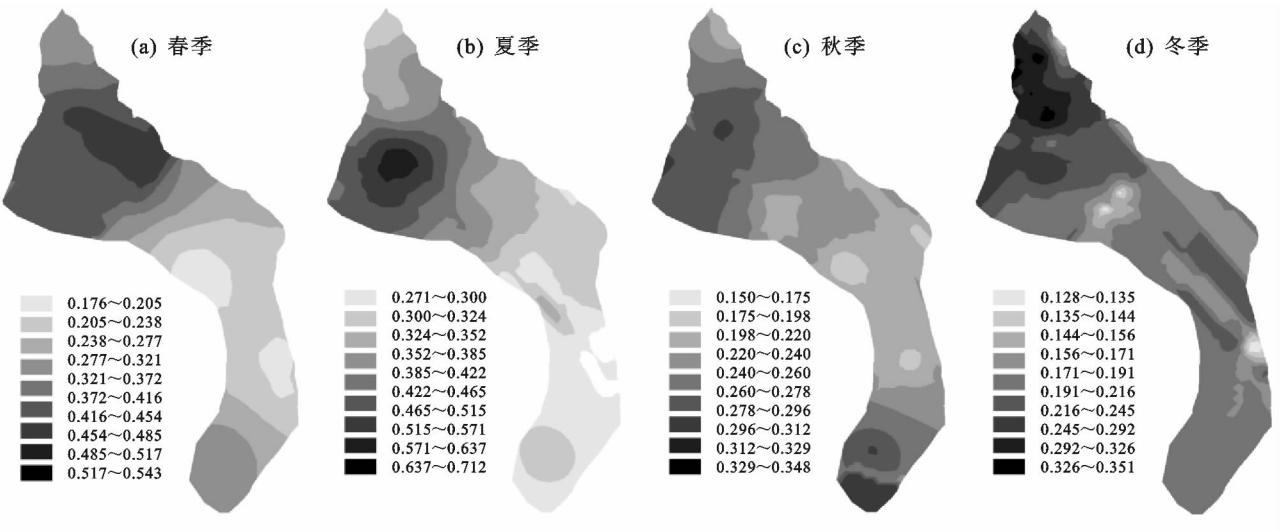
表 3 地下水氮素含量的半方差函数模型和参数

指标	样本数	季节	理论模型	块金值	基台值	块金值/基台值/%	变程/m
TN	50	春	指数	0.042	0.182	23.08	439
		夏	高斯	0.025	0.062	39.98	624
		秋	指数	0.024	0.054	44.55	429
		冬	球状	0	0.006	0	990
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	50	春	球状	0.131	0.229	57.46	383
		夏	高斯	0.250	1.119	22.32	338
		秋	高斯	0.179	0.512	35.00	282
		冬	球状	0.039	0.460	8.52	267
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	50	春	稳定	0	0.033	0	520
		夏	指数	0.019	0.182	10.18	333
		秋	高斯	0.040	0.043	54.09	328
		冬	高斯	0.035	0.199	17.50	300

2.4 不同季节氮浓度的空间分布

由图 4 可知,TN 浓度从整体上来看都是北部高,南部低,西部高,东部低,即上游低、下游高的分布规律。这是由于上游主要是森林,下游自上而下是村庄、梯田和河流,西部是村庄。春季 TN 浓度为 0.176~0.543 mg/L,最大值出现在梯田,最小值出现在森林的下部,夏季 TN 浓度为 0.271~0.712 mg/L,最大值出现在村庄,最小值出现在森林的下部,春夏季受到施肥和降雨的影响,同时村庄内多为硬化地面,透水性差,地表径流

冲刷并携带大量污染物,村庄 TN 浓度增大,随后地表径流携带大量的营养物质进入梯田,使得梯田的浓度增大。田水溢出进入河沟使得河流的浓度增大。秋季 TN 浓度为 0.150~0.348 mg/L,冬季 TN 浓度为 0.128~0.351 mg/L,秋季 TN 的最大值出现在梯田和村庄,最小值出现在森林的下部和河流,冬季最大值与秋季在同一位置,秋冬降雨量少且气温较低,因此 TN 浓度整体较低。下游梯田略高于上游森林,这可能与梯田位于村庄下游有关,主要受到人为活动的影响。



注:图中数据单位为 mg/L。下同。

图 4 TN 浓度季节空间分布

由图 5 可知, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度与 TN 浓度相似,从整体上呈上游低,下游高的分布规律。夏季 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓

度的最大值出现在村庄和上游森林,最小值出现在梯田上部,并且夏季 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的平均浓度为 0.046

mg/L,明显高于春、秋、冬 3 个季节的平均浓度,分别为 0.034,0.031,0.030 mg/L,这是由于夏季降雨量大并且降水对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 有较强的淋溶能力。降雨通过林冠层、枯枝落叶层后,由于降雨的淋洗作用, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度显著升高。而春秋冬季降雨较少,

$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的最大值均出现在村庄和梯田,上游森林 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度较低,而下游梯田受到人为活动的影响 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度略高于上游森林。并且可以看出一年四季村庄的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度均处于较高水平,说明生活污水等为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的主要来源。

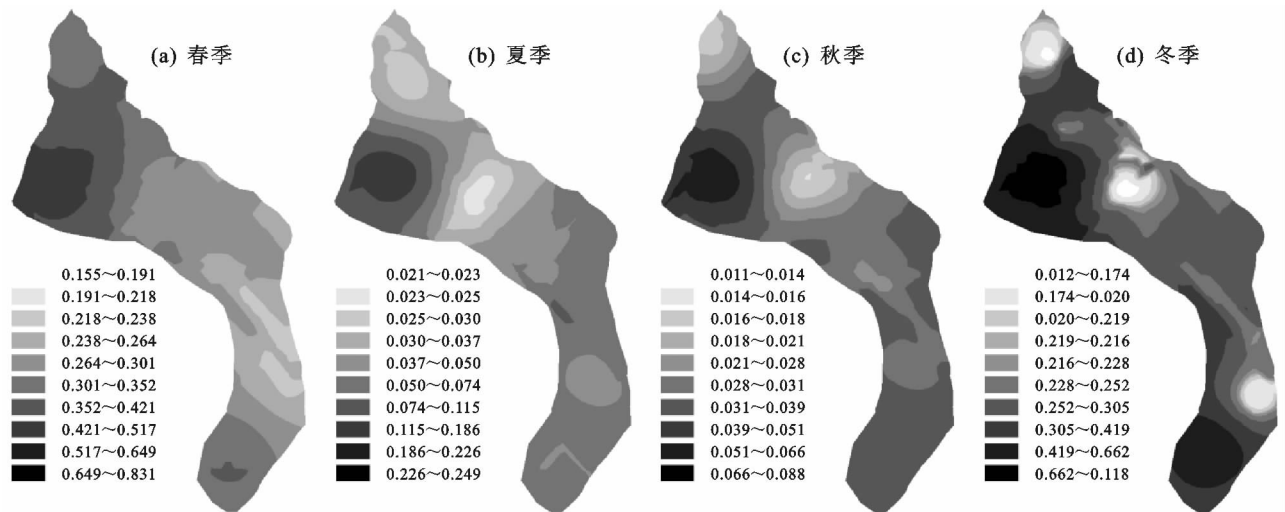


图 5 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度季节空间分布

由图 6 可知, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度从整体上呈上游森林低,下游村庄和梯田高的分布规律。春季 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 0.107~0.307 mg/L,冬季为 0.081~0.257 mg/L,春冬季 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的最大值出现在梯田,最小值出现在森林,夏秋季则分别为 0.057~0.226,0.085~0.221 mg/L,夏秋季 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的最大值出现在村庄和梯

田,最小值出现在森林。春季 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度要明显高于其他季节,冬季次之,春季农事活动频繁,地表径流携带了大量的营养物质进入梯田,使得 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度升高明显,冬季的温度相对较低,动植物和微生物等新陈代谢作用较弱,不能充分吸收和利用 N 元素,故而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度较高。

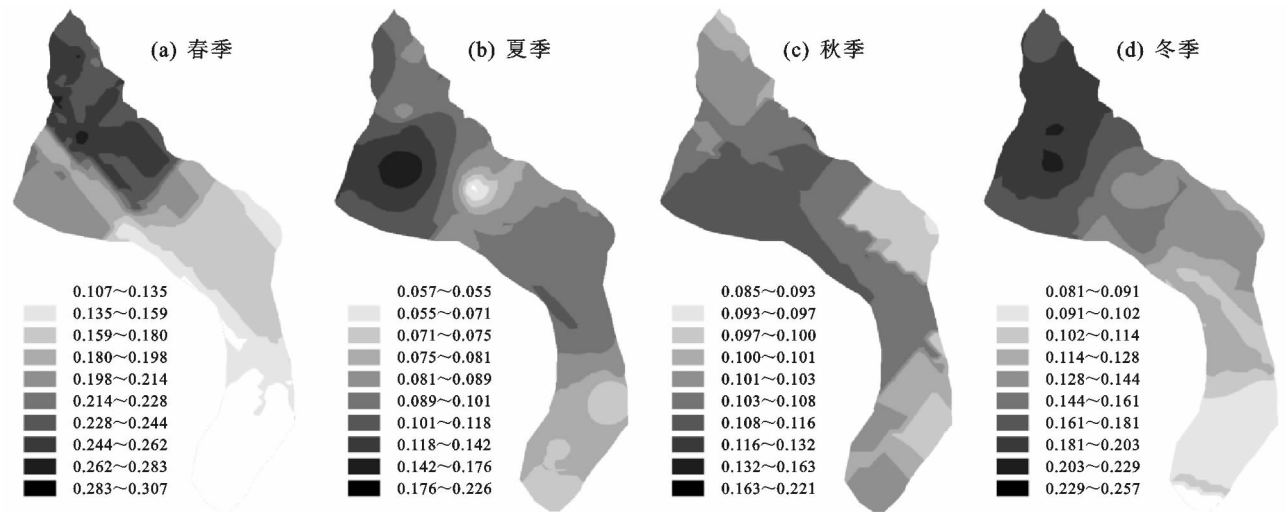


图 6 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度季节空间分布

3 讨论

地表径流中 N 浓度受如水文条件、气候变化、施肥和土地利用方式等多种因素的相互作用和影响^[18]。已有研究^[19]表明,在流域尺度上,土地利用类型或土地利用格局对径流水中氮素的含量和输出具有非常显著的影响。 TN 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的空间分布从整体上来看都是北部高,南部低,西部高,东部低,即村庄>梯田>河流>森林的分布规

律,这与前人研究^[20-22]结果相似。村庄 N 浓度在一年内均处于较高水平,是“源”景观,这与涂安国等^[23]研究胡家山小流域得到耕地和村落能促进面源污染,为“源”景观的结论相似。梯田接收来自上方森林和村庄的污染物,表现出“汇”景观的性质,而梯田在施肥后又是最大的污染源,表现出“源”景观的性质,因此梯田具有双重的性质,这与晏维金等^[24]研究六叉河小流域水稻田氮磷的迁移过程得到的水稻田具有

输入和输出双重性质的结论相似,也与杨金玲等^[25]研究梅村流域得到林地和水塘对径流氮素的输出有负效应,水田和村庄有正效应的结论相似。氮浓度的空间分布特征的研究结果体现了研究区“四素同构”生态系统的水分和营养元素利用模式,顶端的森林发挥涵养水源的功能,为哈尼梯田湿地系统和河流提供了充足的水源保证,并且为中部的村庄提供充分的饮用和生活水源,地表径流携带大量的营养物质进入下方的梯田,梯田不仅发挥了粮食生产的功能,同时也接收了森林释放出的洁净水和村庄中排出的生活污水,因此梯田的氮浓度较高,随后流入河流的氮浓度低于梯田,则说明梯田发挥了人工湿地的功能。

4 结论

(1)除 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度在夏季和冬季呈强变异外,其他 N 浓度在不同季节的变异系数均小于 100%,表现为中等程度变异。

(2)梯田中下部 TN 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的变幅都较大,森林 TN 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的变幅都相对较小。

(3) TN 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在各季节的块金系数均小于 50%,在各季节都具有较强的空间自相关性。 TN 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在各季节的变程均在 1 000 m 以内,表明各指标各个季节分别在不同尺度范围内分布连续,存在空间自相关性。 TN 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度从整体上为村庄>梯田>河流>森林的分布规律。

参考文献:

- [1] Vitousek P M, Naylor R, Crews T, et al. Nutrient imbalances in agricultural development [J]. Science, 2009, 324(5934): 1519-1520.
- [2] Hengpeng L I, Liu X, Huang W. The Non-point output of different landuse types in Zhexi hydraulic region of Taihu basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(3): 401-408.
- [3] 单保庆,尹澄清,白颖,等.小流域磷污染物非点源输出的人工降雨模拟研究[J].环境科学学报,2000,20(1): 33-37.
- [4] 黄满湘,章申.北京地区农田氮素养分随地表径流流失机理[J].地理学报,2003,58(1):147-154.
- [5] 王帅兵,王克勤,宋娅丽,等.等高反坡阶对昆明市松华坝水源区坡耕地氮、磷流失的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):39-45.
- [6] 朱继业,高超,朱建国,等.不同农地利用方式下地表径流中氮的输出特征[J].南京大学学报(自然科学版),2006,42(6):621-627.
- [7] 郑海金,胡建民,黄鹏飞,等.红壤坡耕地地表径流与壤中流氮磷流失比较[J].水土保持学报,2014,28(6):41-45.
- [8] 高玉蓉,许红卫,周斌.稻田土壤养分的空间变异性研究[J].土壤通报,2005,36(6):822-825.
- [9] 崔旭辉,郝羽,邱扬.黄土高原大南沟小流域土壤养分空间分异特征[J].北京师范大学学报(自然科学版),2016,52(4):472-478.
- [10] 闫佰忠,肖长来,刘泓志,等.吉林市城区土地利用对地下水污染空间分布的影响[J].中国环境科学,2015,35(3):934-942.
- [11] 刘瑞民,王学军,郑一,等.地统计学在太湖水质研究中的应用[J].环境科学学报,2002,22(2):209-212.
- [12] 龚清莲,刘颖,汤冰冰.长江宜宾段水质时空分布特性分析[J].环境科学与技术,2016,39(3):111-116.
- [13] 张小娟,宋维峰,吴锦奎,等.元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征[J].环境科学,2015,36(6):2102-2108.
- [14] 和弦,宋维峰,彭永刚,等.元阳梯田全福庄流域水源涵养林的植物多样性分析[J].水土保持研究,2012,19(5):110-114.
- [15] 刘少冲,段文标.红松阔叶混交林林隙土壤养分空间异质性[J].水土保持学报,2011,25(3):142-146.
- [16] 史书.三峡库区典型农业小流域氮磷径流排放及淋溶流失[D].重庆:西南大学,2015.
- [17] 卢圣鄂,王莹燕,陈勇,等.不同施肥制度对石灰性紫色水稻土中氨氧化古菌群落结构的影响[J].生态学报,2016,36(21):6919-6927.
- [18] 王莺,张强,王劲松,等.基于分布式水文模型(SWAT)的土地利用和气候变化对洮河流域水文影响特征[J].中国沙漠,2017,37(1):175-185.
- [19] Hwang S J, Lee S W, Son J Y, et al. Moderating effects of the geometry of reservoirs on the relation between urban land use and water quality [J]. Landscape and Urban Planning, 2007, 82(4): 175-183.
- [20] 张汪寿,李晓秀,王晓燕,等.北运河下游灌区不同土地利用方式非点源氮素输出规律[J].环境科学学报,2011,31(12):2698-2706.
- [21] 徐幸仪,王建群,胡小丽.镇江丘陵区农业流域土地利用对氮素输移的影响[J].水电能源科学,2013,31(2): 112-115.
- [22] 陆海明,尹澄清,王夏晖,等.于桥水库周边农业小流域氮素流失浓度特征[J].环境科学学报,2008,28(2): 349-355.
- [23] 涂安国,尹伟,陈德强,等.丹江口库区典型小流域地表径流氮素动态变化[J].长江流域资源与环境,2010,19(8):926-932.
- [24] 晏维金,尹澄清,孙濮,等.磷氮在水田湿地中的迁移转化及径流流失过程[J].应用生态学报,1999,10(3): 312-316.
- [25] 杨金玲,张甘霖,张华,等.丘陵地区流域土地利用对氮素径流输出的影响[J].环境科学,2003,24(1):16-23.