

川中丘陵区涪江流域土壤矿质氮空间分布特征

李 婷¹, 张世熔¹, 廖明辉², 孙丹峰³, 黄元仿³, 李保国³

(1.四川农业大学资源环境学院, 四川 雅安 625014; 2.四川省地震局测绘工程院, 四川 雅安 625000; 3.中国农业大学资源环境学院, 北京 100193)

摘 要:采用 GPS、地统计及地理信息系统(GIS)相结合的技术和方法研究了川中丘陵区涪江流域土壤矿质氮含量的空间分布特征及其影响因素。结果表明,研究区内土壤硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)和铵态氮($\text{NH}_4\text{-N}$)含量分别为 $(79.21\pm 24.34)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $(8.89\pm 2.47)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,在不同土壤类型中,土壤硝态氮和铵态氮含量存在极显著差异($P<0.01$)。土壤硝态氮含量以许家沟和中河沟区域为中心向北部和南部递增;土壤铵态氮含量以赵家湾、中河沟和任家沟为低值中心($<8.00\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)向两旁逐渐增加。从低海拔到高海拔土壤硝态氮含量呈先增加后降低的趋势,土壤铵态氮含量持续降低;在丘体下部和平坝土壤中硝态氮和铵态氮含量均高于其他 3 种地形土壤中其含量;土壤硝态氮在不同坡度中均值比较为缓坡地>坡地>陡坡地>平地,从平地到陡坡地土壤铵态氮含量呈显著降低趋势;土壤硝态氮含量在小麦与其他作物轮作方式中明显低于油菜与其他作物轮作方式中其含量,土壤铵态氮则相反。

关键词:硝态氮;铵态氮;土壤类型;海拔高度;地形;坡度;种植制度

中图分类号:X833 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)12-2443-07

Spatial Distribution Characteristics of Soil Mineral Nitrogen in Fujiang Watershed in the Hilly Region of the Middle Sichuan, China

LI Ting¹, ZHANG Shi-rong¹, LIAO Ming-hui², SUN Dan-feng³, HUANG Yuan-fang³, LI Bao-guo³

(1.College of Resources and Environment of Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China; 2.Survey Engineering Institute of Earthquake Administration of Sichuan Province, Ya'an 625000, China; 3.Recource and Environment College of China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The spatial distribution characteristics and influential factors of soil nitrate nitrogen($\text{NO}_3\text{-N}$) and ammonium nitrogen($\text{NH}_4\text{-N}$) in Fujiang River Basin were performed by technology of the Global Position System, geostatistics and Geographic Information System(GIS). The results indicated that the contents of soil $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NH}_4\text{-N}$ were $(79.21\pm 24.34)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $(8.89\pm 2.47)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. Meanwhile, the contents of soil $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NH}_4\text{-N}$ took on highly significant difference in different soil types($P<0.01$). The lowest value regions ($<8.00\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) of soil $\text{NO}_3\text{-N}$ contents were mainly distributed in Xujiagou and Zhonghegou, and increased gradually towards south and north part. Taking the Zhaojiawan, Zhonghe Valley and Renjia Valley as the low center, the contents of soil $\text{NH}_4\text{-N}$ increased to the both sides. From low elevation to high elevation, the contents of soil $\text{NO}_3\text{-N}$ were increased firstly then declined and the contents of soil $\text{NH}_4\text{-N}$ were steady decreased. The contents of soil $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NH}_4\text{-N}$ in the bottom of hilly and in the flatland were higher than in other three land-forms. The contents of soil $\text{NO}_3\text{-N}$ were highest in gentle slope land, then in slope land and in steep land, and were lowest in the flat land. However, the contents of soil $\text{NH}_4\text{-N}$ were significantly increased from flat land to steep land. The soil $\text{NO}_3\text{-N}$ contents in the cropping system of wheat-other crop were lower than in the cropping system of rape-other crop, and the soil $\text{NH}_4\text{-N}$ contents were reverse.

Keywords: soil nitrate nitrogen; soil ammonium nitrogen; soil type; elevation; landform; slope; cropping system

土壤矿质氮是作物直接吸收利用的主要氮素形态,其数量多少显著影响着植物生产力^[1-2],然而矿质

氮又会通过氨挥发、硝化-反硝化和硝酸盐淋失等途径损失流失到土壤以外的环境中,导致地下水污染、土壤盐渍化、肥料利用率下降和氮氧化物等温室气体的大量释放等问题^[3-5]。因而国内外学者较多地利用典型土壤剖面或小范围土壤研究了其矿质氮的运移、淋溶流失和硝化-反硝化作用等方面^[6-10],并较集中地探讨了施肥^[11-14]和土地利用/覆盖^[15-17]对土壤矿质氮的影

收稿日期:2010-06-03

基金项目:科技部科技支撑计划(2006BAD10A01,2006BAD10A06 和 2008BAK51B02);四川公益性科技攻关专项(2007NGY006)

作者简介:李 婷(1982—),女,四川广元人,硕士,讲师,主要从事 3S 技术在资源环境中的应用。

通讯联系人:张世熔 E-mail:rsz01@163.com

响,较少涉及区域土壤矿质氮的空间变异研究,而区域范围内土壤矿质氮的探讨可以为提高土壤氮素利用率、环境保护以及有效治理非点源污染提供参考和依据。

涪江流域位于四川盆地中部,土壤肥沃、雨量丰沛,具有灌溉便利、农业开发历史悠久等特点,是我国主要的农业生产基地之一。但区域内降雨量大而集中,植被覆盖率低,人口密集,土地垦殖率高,陡坡开垦较为普遍,使得该区成为四川及长江中上游生态环境最易遭受破坏的地区之一。本文试图在 GPS 和 GIS 技术支持下,采用地统计学等方法研究大尺度条件下涪江流域土壤矿质氮的空间分布特征及其与地形地貌、坡度和种植制度等影响因素之间的定量关系,为优化农业生产管理措施和保护生态环境提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区地处四川盆地中部由盆地向低山过渡地段,介于东经 $105^{\circ}2'26''\sim 105^{\circ}43'25''$,北纬 $30^{\circ}0'18''\sim 31^{\circ}1'52''$ 之间。该区属亚热带湿润季风气候,冬无严寒,夏无酷暑,年均温 17.3°C ,无霜期长,年平均降水量 $602.2\sim 1\,389.2\text{ mm}$,年日照时数 $1\,042\sim 1\,665\text{ h}$ 。全区地势北高南低,海拔介于 $290\sim 650\text{ m}$,地貌以丘陵为主。区内溪河密布,水系发达,以涪江水系为主,包括梓江、青岗河、五洞河和桃花河等。全区成土母质主要以侏罗系蓬莱镇组紫色砂泥岩为主,占全区面积的 86% ,在一、二级阶地以第四系全新统灰棕色冲积物和紫色冲积物为主,二级阶地以上以老冲积物(第四系更新统冰水沉积物和冰碛物)为主。研究区土壤类型主要包括石灰紫色湿润锥形土、石灰紫色正常新成土、钙质湿润正常新成土、复钙潜育水耕人为土、普通铁聚水耕人为土、普通铁渗水耕人为土、漂白铁渗水耕人为土、普通潮湿冲积新成土和石质筒育常湿富铁土 9 类。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品的设计与采集

土壤样点的设计是根据研究区的实际情况并充分考虑其代表性,采用随机采样和重点抽样相结合的方法,既遵照按成土母质、土壤类型、土地利用方式等资料布设样点的原则,又满足统计学的抽样要求。在小麦、油菜收获后进行野外采样,采样时利用 GPS (Etrex) 进行定位读取采样点坐标;每个样点在同一地块内随机采集 3 个点混合组成待测样品(1 个剖面

和 2 个土钻),共采集土样 1 801 个(图 1)。

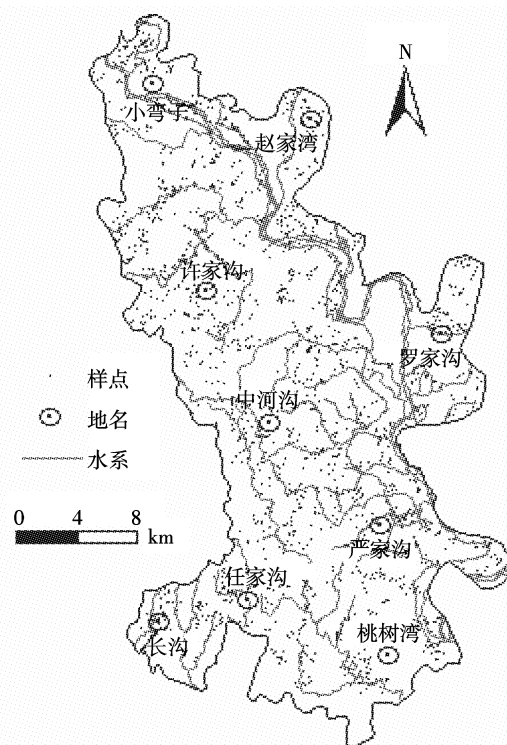


图 1 土壤样点分布图

Figure 1 Distribution map of sampling points

1.2.2 化学分析方法

称取 12.00 g 过 2 mm 筛的新鲜土壤样品于 180 mL 的塑料瓶中,加入 $100\text{ mL } 0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 CaCl_2 溶液,振荡 1 h ,过滤,滤液冷冻保存。测定前解冻,采用连续流动分析法 (FIASAR-2000 continuous flow analytical, CFA) 测定滤液中的硝态氮 ($\text{NO}_3\text{-N}$) 和铵态氮 ($\text{NH}_4\text{-N}$) 含量。

1.2.3 地统计学分析

在 ArcGIS9.2 平台上进行地统计学分析,其中包括半方差函数和克里格插值。

1.2.4 区域统计

在分析海拔高度和坡度对土壤硝态氮和铵态氮影响时,是在 ArcGIS9.2 平台上首先将土壤硝态氮和铵态氮空间插值图转换为栅格图,然后将其栅格图与 DEM 图或坡度图进行区域统计而实现,其结果为区域上的统计,而非样点统计结果。

1.2.5 数据统计分析

采用 SPSS17.0 软件包中的单因素方差分析 (ANOVA) 来检验土壤硝态氮和铵态氮含量在不同土壤类型、地形、坡度和种植制度之间的差异,若有显著

性差异,则进一步进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 土壤矿质氮空间分布总体特征

2.1.1 常规统计分析

在统计软件 SPSS17.0 平台上采用单一样本 K-S 检验的结果表明,川中丘陵区涪江流域土壤硝态氮呈对数正态分布,土壤铵态氮含量呈非正态分布(表 1)。土壤硝态氮和铵态氮平均含量分别为 $(79.21 \pm 24.34) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(8.89 \pm 2.47) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤硝态氮和铵态氮含量分布均呈右偏;从分布的峰度统计结果看,土壤硝态氮含量分布较为集中,呈陡峭形态,土壤铵态氮含量分布相对较为平缓。

因不同土壤类型所具有的物理、化学性质存在差异,其含有的矿质元素、微量元素及水分等都对土壤硝态氮和铵态氮含量有一定的影响,故本文将土样按其土壤类型进行分类,分析不同土壤类型下土壤表层硝态氮和铵态氮的含量分布情况。方差分析表明,土壤硝态氮和铵态氮含量在不同的土壤类型中均存在极显著差异, $F=36.892^{**}(P<0.01)$ 和 $F=71.395^{**}(P<0.01)$ (表 2)。其中,土壤硝态氮和铵态氮含量在复钙潜育水耕人为土中含量均最高,分别达 (123.84 ± 4.50)

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(12.91 \pm 0.05) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,在石灰紫色正常新成土中其含量均最低,为 $(66.80 \pm 20.91) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(6.92 \pm 2.24) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

研究区内普通潮湿冲积新成土和水耕人为土主要分布在涪江流域两岸低阶地上,由近代河流冲积物发育而成,其母质成分复杂,矿质养分丰富,从而在普通潮湿冲积新成土和水耕人为土中硝态氮和铵态氮含量均高。石质简育常湿富铁土则主要位于高阶地上,由第四系更新统冰水沉积物和冰碛物发育形成,其母质风化度深,养分缺乏,土质粘重,土壤中硝态氮和铵态氮含量均较低。石灰紫色湿润锥形土、石灰紫色正常新成土和钙质湿润正常新成土是由侏罗系蓬莱镇组砂泥岩风化后的残、坡积母质发育而成,主要分布在丘陵台地上,其土层浅薄,养分缺乏,故而其中硝态氮和铵态氮含量也较低。

2.1.2 地统计学分析

本文通过地统计分析软件计算出区域化变量的半方差以后,利用 3 种比较成熟的半方差理论模型(球状模型、指数模型、高斯模型)对半方差结果进行拟合(表 3),其交叉误差检验结果表明土壤硝态氮和铵态氮最适半方差模型分别为指数模型和球状模型。采用指数模型对土壤硝态氮进行拟合表明,其方位角

表 1 土壤矿质氮含量统计特征

Table 1 Statistical characters of soil mineral nitrogen

项目	样点数	分布类型	最小值	最大值	平均值	标准差	偏度	峰度
			/mg·kg ⁻¹					
NO ₃ ⁻ -N	1 801	Log-normal	21.60	187.20	79.21	24.34	1.115	2.243
NH ₄ ⁺ -N	1 801	Non-normal	1.04	20.40	8.89	2.47	0.831	1.299

表 2 不同土壤类型中矿质氮含量与方差分析

Table 2 Contents and variance analysis of soil mineral nitrogen in different soil types

土壤类型	样点数	$\text{NO}_3\text{-N}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$				$\text{NH}_4\text{-N}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$			
		最小值	最大值	平均值	标准差	最小值	最大值	平均值	标准差
I	916	30.24	183.6	74.56cB	21.16	1.04	19.04	8.18dC	1.84
II	131	21.6	115.92	66.80dC	20.91	2.8	13.52	6.92dD	2.24
III	194	30.24	150.48	75.93cB	22.6	3.52	14.88	9.13cAB	2.35
IV	4	120.24	128.88	123.84aA	4.5	12.88	12.96	12.91aA	0.05
V	11	38.88	95.04	69.12cdBC	21.03	6	13.04	9.12cdABC	2.71
VI	340	36.72	187.2	92.83bA	23.53	3.84	20.4	10.61abA	2.42
VII	147	32.4	173.52	94.38bA	30.98	3.12	16.16	10.90abA	2.95
VIII	3	99.36	106.56	102.48abA	3.69	9.2	9.28	9.23bcAB	0.05
IX	55	39.6	118.08	71.61cdBC	18.14	5.12	13.28	8.41dBC	1.7

注: I 为石灰紫色湿润锥形土; II 为石灰紫色正常新成土; III 为钙质湿润正常新成土; IV 为复钙潜育水耕人为土; V 为漂白铁渗水耕人为土; VI: 普通铁聚水耕人为土; VII 为普通铁渗水耕人为土; VIII 为普通潮湿冲积新成土; IX 为石质简育常湿富铁土。多重比较采用新复极差法,小写字母代表 0.05 显著水平,大写字母代表 0.01 极显著水平,处理之间有相同字母者差异不显著。下表同。

为北西-南东向(301.3°),最大变程为 45.22 km,最小变程为 42.90 km,块金/基台比为 81.25%,为弱空间变异性,即其受随机因素的影响较结构性因素多。采用球状模型对土壤硝态氮进行拟合表明,其方位角为西-东向(353.4°),最大变程为 43.33 km,最小变程为 18.40 km,块金/基台比为 92.50%,为弱空间变异性,即其变异主要受随机因素的影响。

根据以上获得的半方差理论模型,在 ArcGIS9.2 平台上采用普通克立格法(Ordinary kriging)进行最优内插,获得土壤硝态氮和铵态氮含量的空间分布图

(图 2)。结果表明,研究区土壤硝态氮总体上呈斑块状分布,并且以中等水平($68.00\sim 90.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的分布范围最广,占研究区面积的 69.50%,其中含量为 $21.60\sim 68.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的占 14.65%,含量为 $90.00\sim 187.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的占 15.85%。其低值区($<68.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)主要位于许家沟和中河沟,并以此为中心向北部和南部区域递增;高值区($>90.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)主要位于涪江流域南部的任家沟和桃树沟的西部区域。

研究区土壤铵态氮含量总体上呈斑块状或条带状分布,并以赵家湾、中河沟和任家沟为低值中心($<$

表 3 土壤矿质氮含量的地统计学参数

Table 3 Geostatistical parameters of soil mineral nitrogen

项目	模型	方位角/ $^{\circ}$	变程/km		块金值 C_0	基台值 C_0+C	Nug/Sill C_0/C_0+C	预测误差			
			最小	最大				ME	RMSE	ASE	RMSSE
NO_3^--N	高斯	300.9	43.01	45.22	0.084	0.100	84.00%	0.084 9	22.47	24.62	0.925 9
	指数	301.3	42.90	45.22	0.078	0.096	81.25%	0.008 7	22.23	23.86	0.945 4
	球状	303.4	43.06	45.22	0.081	0.098	82.65%	0.097 8	22.35	24.23	0.936 3
NH_4^+-N	高斯	353.2	16.49	43.33	0.075	0.081	92.59%	0.027 7	2.306	2.582	0.899 8
	指数	356.3	18.38	43.35	0.072	0.080	90.00%	0.035 0	2.283	2.551	0.900 4
	球状	353.4	18.40	43.33	0.074	0.080	92.50%	0.028 5	2.294	2.569	0.900 4

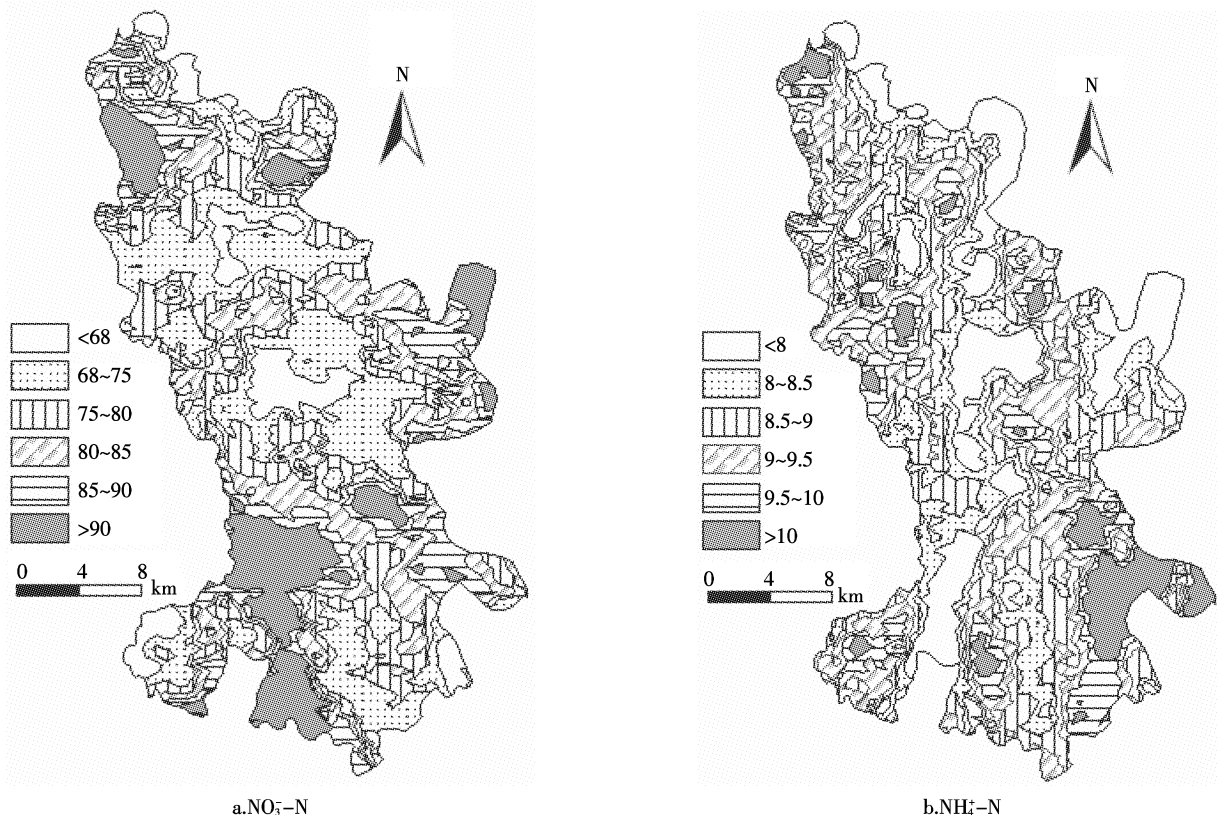


图 2 土壤矿质氮含量空间分布图($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Figure 2 Spatial distribution maps of soil mineral nitrogen contents($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

8.00 mg·kg⁻¹)向两旁逐渐增加,在西北部许家沟和东南部严家沟、桃树湾达到最高(>10.00 mg·kg⁻¹)。区域内中等水平(8.00~10.00 mg·kg⁻¹)的分布范围最广,占研究区面积的 67.31%,含量为 1.04~8.00 mg·kg⁻¹ 的占 23.11%,含量为 10.00~20.40 mg·kg⁻¹ 的占 9.58%。

2.2 影响因素分析

影响土壤矿质氮的因素较多,本文主要探讨海拔高度、地形、坡度和种植制度对土壤矿质氮含量的影响。

2.2.1 海拔高度

方差分析表明,土壤硝态氮含量在不同海拔高度下存在极显著差异, $F=12.839^{**}(P<0.01)$,从低海拔到高海拔土壤硝态氮含量先增加后降低(图 3),其中海拔高度 350~400 m 土壤中硝态氮含量极显著高于其他海拔高度下土壤中其含量。土壤铵态氮含量在不同海拔高度中也存在极显著差异, $F=20.951^{**}(P<0.01)$,从低海拔到高海拔土壤铵态氮含量从(9.33±0.48)mg·kg⁻¹ 逐渐降低到(7.47±0.02)mg·kg⁻¹。

土壤硝态氮和铵态氮含量在不同海拔高度中存在极显著差异可能是与土地利用方式和人为管理措施有关。在海拔高度低于 400 m 区域,其地势平坦,灌溉条件便利,是灌溉水田、水浇地、菜地、果园和桑园的主要分布区域,农民的投入和管理水平较高,使得土壤硝态氮和铵态氮的含量较高;在海拔高度高于 400 m 的区域内主要分布为望天田、旱地和有林地,其能够获得的收益较低,农民施肥量较低或不施肥,由此土壤中硝态氮和铵态氮含量均较低海拔地区要低。

2.2.2 地形

本文利用土壤采样点数据采用传统点位统计法进一步分析地形对土壤矿质氮的影响(表 4),研究区内地形分为平坝、谷、丘体下部、丘体中部和丘体上部

5 种,结果表明,区内土壤硝态氮含量在 5 种地形中存在极显著差异, $F=9.260^{**}(P<0.01)$ 。硝态氮含量在丘体下部土壤中极显著高于其他 4 种地形土壤中其含量,为(83.52±25.27)mg·kg⁻¹,其次为在平坝中其含量为(78.29±23.82)mg·kg⁻¹,谷中土壤硝态氮含量最低,为(75.19±24.19)mg·kg⁻¹。土壤硝态氮在丘体不同部位的差异主要是由丘体土壤养分在降雨侵蚀过程中的再分配所造成的,长期的侵蚀冲刷作用使表土中的养分随着径流水由丘体上部向中、下部位迁移,因此丘体中、下部是其上部养分流失的汇,故而从丘体上部到丘体下部,土壤中硝态氮含量显著增加。与丘体相比,谷中土壤水分状况较好,土地利用方式以水田为主,硝态氮含量较低且易于随水分运动迁移,因而谷中土壤硝态氮略低于丘体土壤,这与魏孝荣和邵明安对黄土高原沟壑区小流域不同地形下土壤硝态氮的研究结果较为类似^[18]。

土壤铵态氮含量在 5 种地形中也存在极显著差异, $F=24.953^{**}(P<0.01)$,平坝和丘体下部土壤中铵态氮含量极显著高于谷、丘体中部和丘体上部土壤中其含量。土壤铵态氮含量在平坝和丘体下部较高可能主要是受土地利用方式和人为管理措施的影响,其在土壤中的迁移性很弱^[9],因而在谷、丘体中部和丘体上部含量较为接近。

2.2.3 坡度

不同坡度具有不同的水分分配条件和物质运移堆积的特点,其土壤中硝态氮和铵态氮的含量也有所差异。本文根据地形将研究区坡度划分 4 类(表 5),即平地(0°~2°)、缓坡地(2°~10°)、坡地(10°~25°)和陡坡地(>25°)。结果表明,硝态氮在 4 类坡度条件下土壤中的含量顺序为缓坡地>坡地>陡坡地>平地,但它们间差异不显著, $F=1.173(P>0.05)$ 。但铵态氮含量在

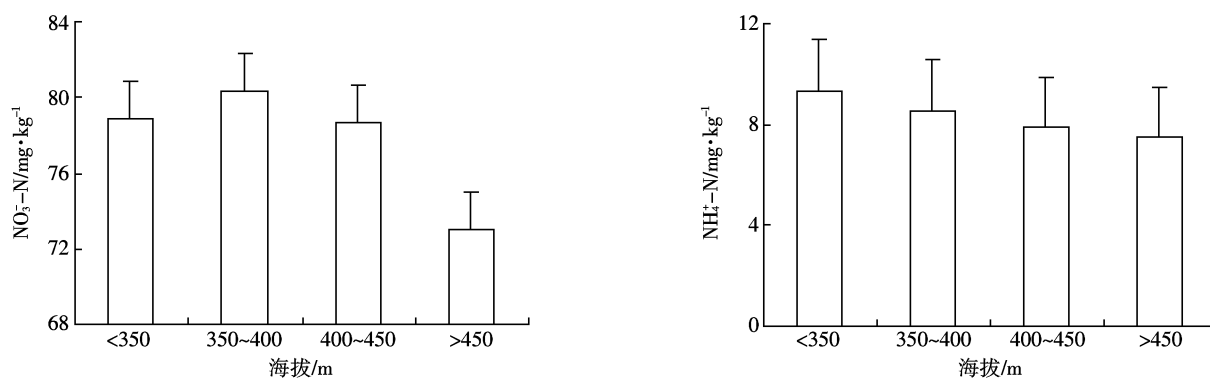


图 3 不同海拔高度下土壤矿质氮含量

Figure 3 Content of soil mineral nitrogen at different elevation

表 4 不同地形土壤矿质氮的均值与方差分析

Table 4 Mean and variance analysis of soil mineral nitrogen contents of different landform

地形	样点数	NO ₃ ⁻ -N/mg·kg ⁻¹				NH ₄ ⁺ -N/mg·kg ⁻¹			
		最小值	最大值	平均值	标准差	最小值	最大值	平均值	标准差
平坝	207	30.00	168.00	78.29bB	23.82	4.16	14.96	9.49aA	2.24
谷	396	24.00	175.00	75.19bB	24.19	1.04	16.72	8.31bB	2.54
丘体下部	672	30.00	184.00	83.52aA	25.27	3.20	19.04	9.46aA	2.42
丘体中部	313	22.00	187.00	77.58bB	24.09	3.12	20.40	8.35bB	2.31
丘体上部	213	34.00	174.00	76.44bB	20.29	2.96	20.24	8.38bB	2.37

4 类坡度土壤中存在显著差异, $F=5.069^*(P<0.05)$,表现为从平地到陡坡地土壤中铵态氮含量呈显著降低趋势。

2.2.4 种植制度

为研究种植制度与农作物种类对土壤中硝态氮和铵态氮的影响,选取区域内 60 处典型长期(至少 3 a)保持同一轮作方式的样地进行了分析(表 6)。研究区种植制度以一年两熟制为主,主要为“小麦-其他作物”和“油菜-其他作物”。分析结果表明,“油菜-花生”轮作方式中土壤硝态氮含量显著高于“油菜-棉花”、“油菜-玉米”和“小麦-玉米/红薯”轮作方式中其含量,与“小麦-棉花”、“小麦-水稻”和“油菜-水稻”轮作方式中其含量无显著差异。土壤铵态氮在“小麦-水稻”轮作方式中其含量最高,其次为“油菜-水稻”和“油菜-花生”,在“油菜-棉花”中其含量最低。总体而言,小麦与其他作物轮作方式中土壤硝态氮含量

(83.08 mg·kg⁻¹) 明显低于油菜与其他作物轮作方式中其含量(88.01 mg·kg⁻¹),但土壤铵态氮含量在小麦与其他作物轮作方式中(9.10 mg·kg⁻¹)明显要高于油菜与其他作物轮作方式中其含量(8.26 mg·kg⁻¹)。

3 结论

(1)川中丘陵区涪江流域土壤硝态氮和铵态氮含量分别为(79.21±24.34)mg·kg⁻¹和(8.89±2.47)mg·kg⁻¹,且在不同土壤类型中硝态氮和铵态氮含量呈极显著差异。土壤硝态氮总体上呈斑块状分布,以许家沟和中河沟为中心向北部和南部区域递增。土壤铵态氮含量总体上呈斑块状或条带状分布,并以赵家湾、中河沟和任家沟为低值中心(<8.00 mg·kg⁻¹)向两旁逐渐增加。

(2)土壤硝态氮和铵态氮含量在不同海拔高度中均存在极显著差异,从低海拔到高海拔土壤硝态氮含

表 5 不同坡度土壤矿质氮的均值与方差分析

Table 5 Mean and variance analysis of soil mineral nitrogen contents of different gradient

项目	0°~2°	2°~10°	10°~25°	>25°	F 值
NO ₃ ⁻ -N/mg·kg ⁻¹	79.24±9.97	80.15±10.45	80.01±10.51	79.70±11.17	1.173
NH ₄ ⁺ -N/mg·kg ⁻¹	9.03±0.32a	8.76±0.11ab	8.56±0.09b	8.48±0.13b	5.069*

注:多重比较采用新复极差法,处理之间有相同字母者差异不显著;*代表 0.05 显著水平。

表 6 不同种植制度土壤矿质氮的均值与方差分析

Table 6 Mean and variance analysis of soil mineral nitrogen contents of different cropping system

项目	样点数	NO ₃ ⁻ -N/mg·kg ⁻¹				NH ₄ ⁺ -N/mg·kg ⁻¹			
		最小值	最大值	平均值	标准差	最小值	最大值	平均值	标准差
小麦-玉米/红薯	25	39.6	120.24	72.09b	18.41	4.16	11.04	8.39bc	1.61
小麦-水稻	8	43.2	122.4	88.02ab	22.78	8.32	14	10.55a	1.70
小麦-棉花	5	61.2	174.24	89.14ab	48.59	7.76	8.96	8.35bcd	0.47
油菜-玉米	5	56.16	94.32	74.30b	14.73	6.64	8	7.26cd	0.61
油菜-棉花	3	56.88	104.4	84.48b	24.67	5.36	8.08	6.32d	1.53
油菜-水稻	9	36.72	118.8	86.40ab	31.12	6.48	12.72	9.76a	2.17
油菜-花生	5	99.36	114.48	106.85a	6.57	9.2	10.48	9.71ab	0.67

注:多重比较采用新复极差法,小写字母代表 0.05 显著水平,处理之间有相同字母者差异不显著。

量呈先增加后降低的趋势,土壤铵态氮含量持续降低。土壤硝态氮含量在丘体下部极显著高于其他4种地形土壤中其含量;土壤铵态氮含量在平坝和丘体下部极显著高于谷、丘体中部和丘体上部土壤中其含量。土壤硝态氮在4类地形中均值比较为缓坡地>坡地>陡坡地>平地,从平地到陡坡地土壤铵态氮含量呈显著降低趋势。总体而言,土壤硝态氮含量在小麦与其他作物轮作方式中明显低于油菜与其他作物轮作方式中其含量,土壤铵态氮相反。

参考文献:

- [1] 周卫军,王凯荣,张光远.有机无机结合施肥对红壤稻田土壤氮素供应和水稻生产的影响[J].生态学报,2003,23(5):914-921.
Zhou W J, Wang K R, Zhang G Y. Some effects of inorganic fertilizer and recycled crop nutrients on soil nitrogen supply and paddy rice production in the red earth region of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5):914-921.
- [2] Hirose D. The effects of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen on alfalfa (*Medicago sativa* L.) yearly growth and nitrogen absorption[J]. *Journal of Japanese Society of Grassland Science*, 2000, 45(4):404-410.
- [3] MacDonald A J, Powlson D S, Poulton P R, et al. Unused fertilizer nitrogen in arable soils: Its contribution to nitrate leaching [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1989, 46(4):407-419.
- [4] 吴金水,郭胜利,党廷辉.半干旱区农田土壤无机氮积累与迁移机理[J].生态学报,2003,23(10):2041-2049.
Wu J S, Guo S L, Dang T H. Mechanisms in the accumulation and movement of mineral N in soil profiles off arming land in a semi-arid region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10):2041-2049.
- [5] Tomiie K, Iwasa Y, Maeda K, et al. Present status and feature of groundwater contamination by nitrate-nitrogen in Kumamoto City[J]. *Journal of Water and Environment Technology*, 2009, 7(1):19-28, 18.
- [6] Brown K W, Thomas J C, Doble R L. Nitrogen source effect on nitrate and ammonium leaching and runoff losses from greens[J]. *Agronomy Journal*, 1982, 74:947-950.
- [7] Ikeda M, Watanabe T. Effectiveness of ammonium-nitrogen and nitrate-nitrogen in irrigation water in paddy rice without topdressed nitrogen at the panicle formation stage[J]. *Science Bulletin of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 2002, 56(2):131-137, 17.
- [8] Yang S M, Li F M, Sukhdev S M, et al. Long-term fertilization effects on crop yield and nitrate nitrogen accumulation in soil in Northwestern China[J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96(4):1039-1049.
- [9] 纪雄辉,郑圣先,石丽红,等.洞庭湖区不同稻田土壤及施肥对养分淋溶损失的影响[J].土壤学报,2008,45(4):663-671.
Ji X H, Zheng S X, Shi L H, et al. Effect of fertilization on nutrient leaching loss from different paddy soils in Dongting Lake Area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(4):663-671.
- [10] 熊淑萍,姬兴杰,李春明,等.不同肥料处理对土壤铵态氮时空变化影响的研究[J].农业环境科学学报,2008,27(3):978-983.
Xiong S P, Ji X J, Li C M, et al. Effect of different fertilizer treatments on spatial-temporal variations of soil ammonium nitrogen[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):978-983.
- [11] 杨学云,张树兰,袁新民,等.长期施肥对壤土硝态氮分布、累积和移动的影响[J].植物营养与肥料学报,2001,7(2):134-138.
Yang X Y, Zhang S L, Yuan X M, et al. A long-term experiment on effect of organic manure and chemical fertilizer on distribution, accumulation and movement of $\text{NO}_3\text{-N}$ in soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(2):134-138.
- [12] 宗海英,王凯荣,谢小立.长期施肥对红壤性水稻土有机氮组分的影响[J].应用生态学报,2008,19(8):1721-1726.
Zong H Y, Wang K R, Xie X L. Effects of long term fertilization on soil organic nitrogen components in paddy soil derived from red earth[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(8):1721-1726.
- [13] Robert L W, Randal K B, William R R, et al. Ammonium and nitrate nitrogen in soil profiles of long-term winter wheat fertilization experiments[J]. *Agronomy Journal*, 1994, 86:94-99.
- [14] Upendra M S, Bharat P S, Wayne F W, et al. Accumulation and crop uptake of soil mineral nitrogen as influenced by tillage, cover crops, and nitrogen fertilization[J]. *Agronomy Journal*, 2007, 99:682-691.
- [15] Gong J, Chen L D, Fu B J, et al. Integrated effects of slope aspect and land use on soil nutrients in a small catchment in a hilly loess area, China[J]. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 2007, 14(3):307-316.
- [16] Floyd W C, Schoenholtz S H, Griffith S M, et al. Nitrate-nitrogen, land use/land cover, and soil drainage associations at multiple spatial scales [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(4):1473-1482, 45.
- [17] Lamsal S, Bliss C M, Graetz D A. Geospatial mapping of soil nitrate-nitrogen distribution under a mixed-land use system[J]. *Pedosphere*, 2009, 19(4):434-445, 32.
- [18] 魏孝荣,邵明安.黄土高原沟壑区小流域不同地形下土壤性质分布特征[J].自然资源学报,2007,22(6):946-953.
Wei X R, Shao M A. Distribution of soil properties as affected by land-forms in small watershed of Loessial Gully Region[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(6):946-953.
- [19] 李生秀.中国旱地农业[M].北京:中国农业出版社,2004.
Li S X. Dryland agriculture in China[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2004.