

# 黄土高原王东沟小流域土壤表层氮的空间分布

赵晓芳<sup>1,2</sup>, 黄明斌<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**以黄土高原王东沟小流域为研究对象,分析了小流域地貌单元和土地利用方式对氮空间分布的影响。结果表明:研究区表层(0—20 cm)土壤全氮、硝态氮和铵态氮含量的均值分别为 0.99, 9.80, 2.61 mg/kg。土地利用类型和地貌单元对土壤全氮和硝态氮的空间分布有显著的影响,并且两个因素存在着显著的交互作用,而对铵态氮含量空间分布影响不显著。不同土地利用类型土壤全氮分布规律为:林地>果园>荒草地>农田>废弃果园;硝态氮分布规律为:果园>农田>林地>废弃果园>荒草地;铵态氮分布规律为:林地>荒草地>果园>农田>废弃果园。不同地貌单元土壤全氮分布规律为:塬面>沟道>塬坡;硝态氮分布规律为:塬面>塬坡>沟道;铵态氮分布规律为:沟道>塬面>塬坡。上述研究结果对指导黄土高原沟壑区土地资源利用、施肥和植被恢复管理有重要参考价值。

**关键词:**全氮; 硝态氮; 铵态氮; 土地利用类型; 地貌单元

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)04-0062-06

## Spatial Distribution of Nitrogen of Topsoil in the Wangdonggou Watershed of the Loess Plateau

ZHAO Xiaofang<sup>1,2</sup>, HUANG Mingbin<sup>2</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Wangdonggou watershed with the area of 8.3 km<sup>2</sup> is located in the gully-hilly region of the Loess Plateau. The objective of this study is to analyze the effects of different land use types and geomorphic units on the spatial distribution of soil nitrogen of topsoil in Wangdonggou watershed. The results indicated that the mean contents of total nitrogen, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in the surface layer of the study area were 0.99 g/kg, 9.80 mg/kg, 2.61 mg/kg, respectively. Land use types and geomorphic units had significant effects and interaction on the spatial distribution of soil total nitrogen and nitrate nitrogen, while the spatial variability of ammonium nitrogen content was not significant. The content of soil total nitrogen under different land use types decreased in the order: woodland>orchard>natural grassland>farmland>abandoned orchard; the content of nitrate nitrogen decreased in the order: orchard>farmland>woodland>abandoned orchard>natural grassland; the contents of ammonium nitrogen decreased in the order: woodland>natural grassland>orchard>farmland>abandoned orchard. The content of soil total nitrogen under different geomorphic units decreased in the order: loess tableland>gully>slope land; the content of nitrate nitrogen decreased in the order: loess tableland>gully>slope land; the content of ammonium nitrogen decreased in the order: gully>loess tableland>slope land. Understanding the spatial distribution of soil nitrogen and its components in the small watershed of the Loess Plateau can help improve management efficiencies of land use, fertilizer, and vegetation restoration on small watershed scale on the Loess Plateau.

**Keywords:** total nitrogen; nitrate-nitrogen; ammonium-nitrogen; land use type; geomorphic unit

土壤作为在时间和空间上的连续体,它的变异是许多因素相互作用的结果,具有尺度上的相关性。土壤空间变异可分为物理性质的空间变异和化学性质的空间变异,其中对土壤化学性质的空间变异研究主要集中在土壤养分空间变异性。土壤氮作为土壤养分的重要组成部分一直是土壤养分空间变异研究的热点领域<sup>[1]</sup>。土壤中的氮可以分为有机态氮和无机态氮,有机态氮占土壤全氮的80%~95%,剩余的则是以硝态氮和铵态氮为主要存在形态的无机态氮。土壤中的有机态氮不能被植物吸收利用,能够被植物直接吸收利用的是以硝态和铵态形式存在的无机态氮。

土壤氮空间变异受诸多因素的影响,不同空间尺度上影响氮空间分布的因素不一样。如李龙等<sup>[2]</sup>对内蒙古赤峰市敖汉旗黄花甸子流域全氮空间分布进行了研究,认为不同的坡度、坡向、海拔和土地利用类型对全氮空间分布存在着显著影响。吴德勇等<sup>[3]</sup>对德阳旌阳区土壤氮素空间变异特征进行分析,研究结果表明研究区土壤全氮空间变异主要受母质、地形等结构因素的综合影响,而人为活动因素是碱解氮空间变异的主控因素。Hirobe等<sup>[4]</sup>对日本柳杉土壤氮素转化格局空间变异的研究发现坡度和坡向对其有重要的影响。訾伟等<sup>[5]</sup>对贵州中部典型喀斯特高原地貌类型的陈家寨小流域土壤养分空间变化进行研究,发现不同土地利用方式下养分含量是有很大差异。上述研究结果均表明,不同地区影响养分空间分布的因素是不同的。

本文选择黄土高原王东沟小流域为研究对象,由于其特殊的地形地貌,影响其养分空间分布的因素主要有地貌单元和土地利用方式两种。随着人类的生产活动,地貌单元发生改变,土地利用方式增多。因此,本研究中对王东沟流域地貌单元和土地利用方式的进行新的划分,采用经典统计学分析和地统计方法,分析不同地貌单元和土地利用类型对全氮、硝态氮和铵态氮的空间异质性的影响,阐明氮素的空间变异特征,为估算黄土高原更大尺度土壤养分的空间分布特征、合理施肥养分管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

王东沟小流域隶属于陕西省长武县(107°40′30″—107°42′30″E,35°12′—35°16′N),位于黄土高原中南部地区,海拔940~1 220 m,属典型的黄土高原沟壑区,沟壑密度2.78 km/km<sup>2</sup>,流域总面积8.3 km<sup>2</sup>。属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温9.1℃,无霜期171 d,年平均降水量584 mm,降水季节性分布不均,主要集中在7—9月份。主要的土壤类型为黑垆土,土质疏松深

厚,母质是中壤质马兰黄土。该流域是传统的旱作农业区,包括王东和丈六两个自然村,土地利用类型主要有农地、荒草地、果园、和林地等。

### 1.2 样品采集与测定方法

1.2.1 样品采集方法 2017年7月份在王东沟流域用内径为3 cm的半圆形土钻对其表层土壤进行了多点和重复采样,采样深度为0—20 cm。此次共采集土壤样品267个(图1)。其中,塬面土地利用类型主要为农地、果园和少量的废弃果园及荒草地,共采集了84个土样。坡面土地利用类型有农地、果园、废弃果园、林地和荒草地,共采集了114个土样。沟道主要土地利用类型有林地和荒草地,采集了69个土样。每个采样点均用手持GPS定位经纬度。

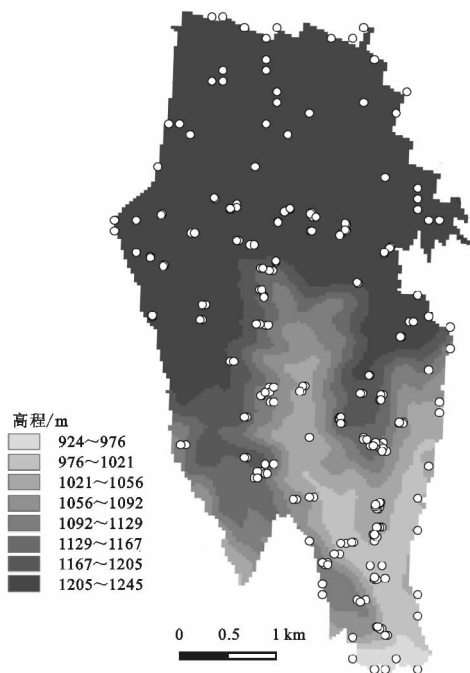


图1 黄土高原沟壑区王东沟小流域高程和表层(0—20 cm)土壤采样点分布

1.2.2 样品测定方法 将采集的新鲜土壤样品充分混匀后,一部分鲜样直接用于测定土壤硝态氮和铵态氮,另一部分鲜样放置阴凉通风的地方自然风干,经自然风干的土壤样品磨细过0.25 mm筛后用于全氮的测定。土样中硝态氮和铵态氮的测定方法是:将新鲜土样先用2 mol/L的KCL浸提,再用连续流动分析仪测定硝态氮和铵态氮的含量<sup>[6]</sup>。土样中的全氮的测定方法是:半微量凯氏定氮法<sup>[7]</sup>。

### 1.3 数据处理

不同地貌单元、土地利用方式对全氮、硝态氮和铵态氮的影响用SPSS 20.0进行方差分析,分析其显著性水平。通常认为显著性水平<0.001的影响是极显著,显著性水平<0.05的影响是显著,显著性水平>0.05的影响是不显著<sup>[8]</sup>。同时利用SPSS 20.0

中的 K-S 检验法对数据进行正态分布检验,若 K-S 检验的  $p$  值 $>0.05$ ,则表明数据都服从正态分布,可以进行经典描述统计分析,若 K-S 检验的  $p$  值 $<0.05$ ,则进行对数正态检验,符合对数正态分布也可进行经典描述统计分析。用 SPSS 20.0 对测得的全氮、硝态氮和铵态氮的数据进行描述统计分析,分析出能反映所测数据性质的均值、中值、标准差、极小值、极大值、变异系数、偏度和峰度。偏度表征土壤养分含量数据分布偏斜方向和程度的度量,是土壤养分数据分布非对称程度的数字特征。峰度表征土壤养分含量数据分布形态的陡缓程。变异系数表征土壤养分特性的空间变异程度。变异系数可定义为:

$$C_v=\frac{\sigma}{\mu}$$

(1)

式中: $C_v$ 为变异系数; $\sigma$ 为标准差; $\mu$ 为均值。通常认为变异系数 $\leq 10\%$ 时为弱变异,变异系数介于 $10\% \sim 100\%$ 时为中等变异,变异系数 $\geq 100\%$ 则为强变异<sup>[9]</sup>。

将采样点 GPS 定位数按不同地貌单元导入 ArcGIS 10.2 中,每个点赋以相应的氮含量的属性值,经阿尔伯斯投影转化,生成以米为单位的平面坐标,利用地统计分析模块克里金内插法,先分别生成各个地貌单元氮含

量分布图,最后叠加合成小流域氮含量分布图。

2 结果与分析

2.1 不同地貌单元和土地利用类型下全氮空间分布特征

全氮空间分布影响因素中,地貌单元的显著性水平 $<0.05$ ,土地利用类型的显著性水平 $<0.001$ ,地貌单元 $\times$ 土地利用类型的显著性水平 $<0.001$ (表 1)。说明地貌单元和土地利用类型对全氮的空间异质性影响是显著的,并且地貌单元和土地利用类型存在着显著的交互作用。全氮的空间变异系数为 $21.21\%$ (表 2),空间分布呈中等程度变异。该流域土壤表层全氮含量均值为 $0.99\text{ g/kg}$ ,农田、果园、废弃果园、林地、荒草地全氮均值含量分别为: $0.92,1.06,0.87,1.08,0.94\text{ g/kg}$ (表 3),塬面、塬坡、沟道全氮均值含量分别为: $1.04,0.96,1.01\text{ g/kg}$ (表 4)。可知小流域不同土地利用类型下土壤全氮变化趋势是:林地 $>$ 果园 $>$ 荒草地 $>$ 农田 $>$ 废弃果园,不同地貌单元下土壤全氮变化趋势是:塬面 $>$ 沟道 $>$ 塬坡。各地貌单元土壤中全氮含量经统计分析后可知呈正态分布(表 4),因此可将其数据导入 ArcGIS 10.2 中做出含量分布图(图 2)。

表 1 王东沟小流域地貌单元与土地利用类型对氮含量影响的方差分析

养分类型	误差来源	自由度	均方	方差	显著性水平
全氮	地貌单元	2	0.25	7.8	$<0.05$
	土地利用类型	4	0.57	17.67	$<0.001$
	地貌单元 $\times$ 土地利用类型	4	0.19	5.84	$<0.001$
硝态氮	地貌单元	2	396.49	6.01	$<0.05$
	土地利用类型	4	2302.744	34.91	$<0.001$
	地貌单元 $\times$ 土地利用类型	4	65.87	5.71	$<0.001$
铵态氮	地貌单元	2	1.56	0.33	$>0.05$
	土地利用类型	4	5.98	1.25	$>0.05$
	地貌单元 $\times$ 土地利用类型	4	4.57	0.95	$>0.05$

表 2 不同养分类型描述性统计特征值

养分类型	样本数	均值/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	中值/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	标准差/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	极小值/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	极大值/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	偏度	峰度	变异 系数/%	分布 状态
全氮	267	990	980	210	590	1700	0.56	0.58	21.21	正态分布
硝态氮	267	9.80	4.88	11.45	0.39	54.97	1.56	1.76	115.77	对数正态分布
铵态氮	267	2.61	2.07	1.89	0.35	9.94	1.80	3.67	73.54	对数正态分布

张春霞等<sup>[10]</sup>2003 年对王东沟流域不同土地利用类型和地貌单元下全氮含量进行了研究。研究结果表明,塬面、坡埧地和山地全氮均值含量分别为 $0.80,0.65,0.66\text{ g/kg}$ ,农田、果园、林地和草地全氮均值含量分别为 $0.81,0.69,0.89,0.77\text{ g/kg}$ 。王东沟流域土地利用经过十几年的恢复和变化不同土地利用类型全氮含量均有明显提高,林地依然是所有土地利用方式中全氮含量最

高的。这是因为林地含有大量枯枝落叶层,枯枝落叶通过微生物分解之后会向土壤供给养分,所以林地全氮含量最高。果园有机氮肥和无机氮肥长期大量的投入,使得氮在果园土壤中有了一定的积累,所以果园土壤全氮含量有了显著的上升,高于农田和荒草地。农田和荒草地全氮均值含量分别为 $0.92,0.94\text{ g/kg}$ (表 3),两者均值含量差别不大,加之采样农田的类型部分为 7 月份已

收割的小麦地,土壤中的部分氮素已被小麦吸收利用,所以农田的全氮均值含量会略低于荒草地。不同的地貌单元下土地利用类型有很大差异,果园和农田主要集中在塬面,林地和荒草地主要分布在沟道,所以塬面和沟道全氮含量高于塬坡。

2.2 不同地貌单元和土地利用类型下硝态氮空间分布特征

影响硝态氮空间变异因素中,地貌单元的显著性水平<0.05,土地利用方式的显著性水平<0.001,地貌单

元×土地利用类型的显著性水平<0.001(表 1)。说明地貌单元和土地利用方式对硝态氮的空间异质性影响是显著的,并且地貌单元和土地利用类型存在着显著的交互作用。硝态氮的空间变异系数为 115.77%(表 2),空间变异程度属强变异。该流域土壤表层硝态氮均值含量 9.80 mg/kg,农田、果园、废弃果园、林地、荒草地硝态氮均值含量分别为:16.49,22.99,3.66,4.85,1.03 mg/kg(表 3),塬面、塬坡、沟道硝态氮均值含量分别为:20.55,7.00,2.57 mg/kg(表 4)。

表 3 不同土地利用类型描述性统计特征值

土地 类型	样本数	养分 类型	均值/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	中值/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	标准差/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	极小值/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	极大值/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	偏度	峰度	变异 系数/%	K-S 检验 p 值
农田	54	全氮	920	960	160	630	1260	-0.25	-0.77	17.39	0.05
		硝态氮	16.49	14.77	12.96	2.14	54.97	1.18	1.11	78.59	0.29
		铵态氮	2.53	1.96	2.00	0.42	8.87	1.48	1.85	76.05	0.09
果园	54	全氮	1060	1090	200	690	1570	0.274	1.075	18.87	0.09
		硝态氮	22.99	19.12	10.53	10.06	38.63	0.23	-1.73	45.80	0.05
		铵态氮	2.64	1.96	1.91	0.59	8.95	1.73	3.47	72.35	0.51
废弃果园	27	全氮	870	850	120	650	1080	-0.01	-0.94	13.79	0.76
		硝态氮	3.66	3.19	2.45	0.60	9.73	0.85	0.25	66.94	0.80
		铵态氮	1.76	1.55	0.69	0.57	2.98	0.10	-1.27	38.33	0.12
林地	72	全氮	1080	1070	250	590	1700	0.22	-0.05	23.15	0.99
		硝态氮	4.85	4.22	3.17	0.74	13.14	0.71	-0.20	65.36	0.22
		铵态氮	3.16	2.53	2.44	0.49	9.94	1.45	1.63	77.22	0.07
荒草地	60	全氮	940	900	160	700	1240	0.36	-1.04	17.02	0.07
		硝态氮	1.03	0.93	0.41	0.39	1.94	0.36	-0.98	39.81	0.30
		铵态氮	2.98	1.95	1.53	0.35	7.31	0.82	0.33	61.69	0.13

表 4 不同地貌单元描述性统计特征值

地貌 单元	样本数	养分 类型	均值/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	中值/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	标准差/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	极小值/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	极大值/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	偏度	峰度	变异 系数/%	分布 状态
塬面	84	全氮	1040	1010	120	690	1300	-0.40	1.77	11.54	正态分布
		硝态氮	20.55	16.86	14.57	1.06	81.81	1.29	2.47	70.90	正态分布
		铵态氮	2.80	1.91	2.36	0.59	14.38	2.324	7.08	84.29	对数正态分布
塬坡	114	全氮	960	920	250	590	1700	0.90	0.43	26.04	正态分布
		硝态氮	7.00	3.65	8.66	0.47	38.63	2.21	4.42	123.7	对数正态分布
		铵态氮	2.67	1.96	2.14	0.42	9.56	1.67	2.60	80.15	对数正态分布
沟道	69	全氮	1010	910	200	720	1480	0.65	-0.42	19.80	正态分布
		硝态氮	2.57	1.18	2.66	0.39	10.36	1.42	0.72	103.5	对数正态分布
		铵态氮	2.93	2.65	2.05	0.35	9.94	1.57	3.24	69.97	正态分布

因此可知小流域不同土地利用类型下土壤硝态氮变化趋势为:果园>农田>林地>废弃果园>荒草地,不同地貌单元下土壤硝态氮变化趋势为:塬面>塬坡>沟道。各地貌单元土壤中硝态氮含量经统计分析后可知呈正态分布和对数正态分布(表 4),因此可将其数据导入 ArcGIS 10.2 中做出含量分布图(图 3)。

由于地貌单元和土地利用类型的不同,农田和果园硝态氮含量会受施肥的影响。本次对王东沟小流域土壤样品的采集是在 7 月份,经调查果园的施肥期

主要集中在 6 月份,氮肥的施用种类有复合肥、尿素、硝铵等<sup>[11]</sup>。由于施肥不久果园土壤中会残留大量未被果树吸收利用的硝态氮,同时硝态氮未大量淋失,加之黄土高原土质疏松多孔易将土壤中的部分铵态氮肥的铵态离子氧化成硝态离子,使得果园土壤中的硝态氮含量明显升高,高于其他土地利用类型。农田也由于肥料的长期投入,使得硝态氮含量有了一定的积累。林地和荒草地硝态氮的来源主要靠枯枝落叶层的分解,且硝态氮在林地和草地无机态氮中所占比

例低于 30%<sup>[12-13]</sup>,所以不同土地利用类型下林地和荒草地硝态氮含量低于果园和农田。由于果园和农

田大部分分布在塬面,因此不同地貌单元下硝态氮含量高于塬坡和沟道。

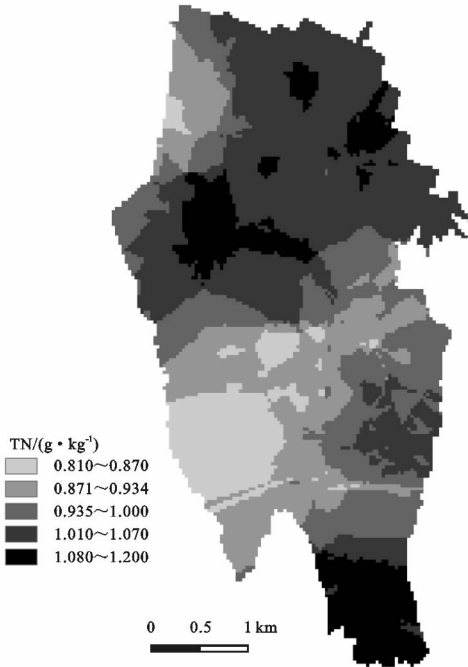


图 2 黄土高原沟壑区王东沟小流域表层 (0—20 cm)全氮含量分布

### 2.3 不同地貌单元和土地利用类型下铵态氮空间分布特征

不同地貌单元和土地利用类型对铵态氮空间分布显著性影响水平 $>0.05$ ,地貌单元和土地利用类型交互作用显著性水平平均 $>0.05$ (表 1),说明地貌单元、土地利用方式对铵态氮空间分布没有显著影响,地貌单元和土地利用类型不存在交互作用。王东沟小流域不同土地利用类型农田、果园、林地、荒草地、废弃果园土壤铵态氮含量分别为:2.53,2.64,3.76,2.98,1.76 mg/kg(表 3),不同地貌单元塬面、塬坡和沟道铵态氮含量分别为 2.80,2.67,2.93 mg/kg(表 4),不同土地利用类型和地貌单元下铵态氮含量差别不是很大。同时可知小流域不同土地利用类型下土壤铵态氮变化趋势为:林地 $>$ 荒草地 $>$ 果园 $>$ 农田 $>$ 废弃果园,不同地貌单元下土壤铵态氮变化趋势为:沟道 $>$ 塬面 $>$ 塬坡。各地貌单元土壤中铵态氮含量经统计分析后可知呈正态分布和对数正态分布(表 4),因此可将其数据导入 ArcGIS 10.2 中做出含量分布图(图 4)。

刘和满等<sup>[12]</sup>对藏东南色季拉山沟壑区土壤氮素空间分布特征研究结果表明,林地中铵态氮占无机态氮的 78%。张学龙等<sup>[13]</sup>对祁连山青海云杉林土壤氮的含量特征研究表明,铵态氮是土壤有效态氮的主要形式,所占比例在 70%以上。廖圣祥等<sup>[14]</sup>对草地硝态氮和铵态氮研究会发现,草地铵态氮含量明显高于

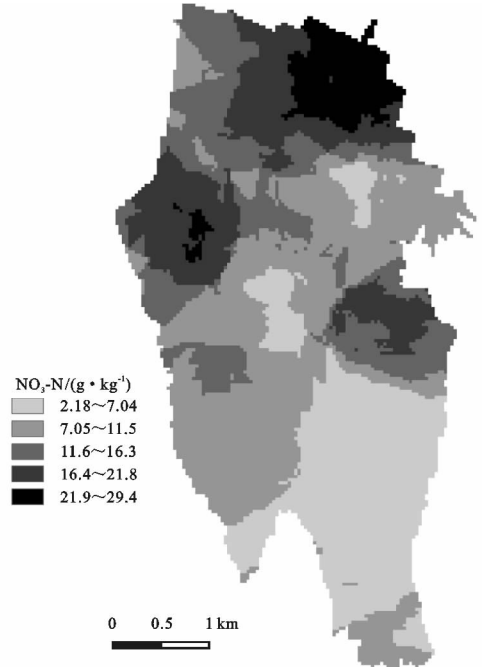


图 3 黄土高原沟壑区王东沟小流域表层 (0—20 cm)硝态氮含量分布

硝态氮。上述研究结果表明,林地和草地中铵态氮含量显著地高于硝态氮,是无机态氮的主要存在形态。果园和农田中铵态氮含量较低,也没有枯枝落叶层分解向土壤中释放铵态氮,所以不同土地利用类型下林地和荒草地铵态氮的含量高于果园和农田。沟道土地利用类型只有林地和荒草,因此不同地貌单元下沟道铵态氮含量高于塬面和塬坡。

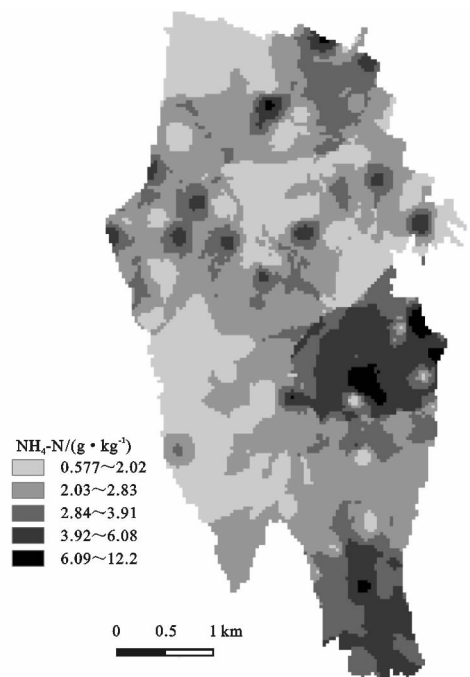


图 4 黄土高原沟壑区王东沟小流域表层 (0—20 cm)铵态氮含量分布

### 3 结论

研究结果表明在不同土地利用类型下土壤全氮分布规律为:林地>果园>荒草地>农田>废弃果园;硝态氮分布规律为:果园>农田>林地>废弃果园>荒草地;铵态氮分布规律为:林地>荒草地>果园>农田>废弃果园。不同地貌单元下土壤全氮分布规律为:塬面>沟道>塬坡;硝态氮分布规律为:塬面>塬坡>沟道;铵态氮分布规律为:沟道>塬面>塬坡。同时研究发现地貌单元和土地利用方式对全氮和硝态氮空间分布的影响是显著的,对铵态氮空间分布没有显著的影响,且相比于地貌单元,土地利用方式对全氮和硝态氮空间分布的影响更为显著,因此,在研究黄土高原地貌单元和土地利用方式对全氮和硝态氮空间分布影响时,应着重考虑土地利用方式对其分布的影响。上述研究结果可用于指导黄土高原沟壑区小流域土壤施肥管理和估算黄土高原更大尺度氮空间分布提供依据。

#### 参考文献:

- [1] 潘成忠,上官周平. 土壤空间变异性研究评述[J]. 生态环境,2003,12(3):371-375.
- [2] 李龙,姚云峰,秦富仓,等. 黄花甸子流域土壤全氮含量空间分布及其影响因素[J]. 应用生态学报,2015,26(5):1306-1312.
- [3] 吴德勇,张新,李启权,等. 德阳旌阳区土壤氮素空间变异特征及影响因素分析[J]. 农业现代化研究,2014,35

(6):814-820.

- [4] Hirobe M, Tokuchi N, Iwatsubo G. Spatial variability of soil nitrogen transformation patterns along a forest slope in a *Cryptomeria japonica* D. Don plantation[J]. European Journal of Soil Biology, 1998,34(3):123-131.
- [5] 訾伟,王小利,段建军等. 喀斯特小流域土地利用对土壤有机碳和全氮的影响[J]. 山地农业生物学报,2013,32(3):218-223.
- [6] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [7] 王磊,李艳红,袁婕. 全自动凯氏定氮仪测定干旱区土壤中全氮含量[J]. 中国无机分析化学,2014,4(3):31-34.
- [8] 周玉龙,贾富国,付倩,等. 贮藏条件对糙米水分变化的影响规律[J]. 农业工程学报,2011,27(7):383-386.
- [9] 胡江玲,张高. 新疆精河流域土壤质量空间分异规律分析[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(6):113-121.
- [10] 张春霞,郝明德,王旭刚,等. 黄土高原沟壑区小流域土壤养分分布特征[J]. 水土保持研究,2003,10(1):78-80.
- [11] 杨玥,同延安,路永莉,等. 陕西省苹果园土壤肥力与施肥现状评估[J]. 干旱地区农业研究,2016,34(5):166-179.
- [12] 刘合满,曹丽花,曾加芹. 藏东南色季拉山沟壑区土壤氮素空间分布特征[J]. 生态学报,2016,36(1):127-133.
- [13] 张学龙,赵维俊,车宗玺. 祁连山青海云杉林土壤氮的含量特征[J]. 土壤,2013,45(4):616-622.
- [14] 廖圣祥,任运涛,袁晓波,等. 围封对黄土高原草地土壤铵态氮和硝态氮的影响[J]. 草业科学,2016,33(6):1044-1053.

(上接第61页)

- [34] Haynes R J, Swift R S. Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content [J]. European Journal of Soil Science, 2010,41(1):73-83.
- [35] 蔺芳,邢晶鑫,任思敏,等. 鸡粪与化肥配施对饲用小黑麦/玉米轮作土壤团聚体分形特征与碳库管理指数的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(5):183-189,196.
- [36] 何超,王磊,郑粉莉,等. 垄作方式对薄层黑土区坡面土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(5):24-28.
- [37] 温磊磊,郑粉莉,沈海鸥,等. 东北典型黑土区农耕土壤团聚体流失特征[J]. 土壤学报,2015,52(3):489-498.
- [38] 冯强,张骁,段宝玲. 基于湿筛法与水滴冲击法的土壤

团聚体指标与土壤侵蚀关系[J]. 山西农业科学,2016,44(7):965-971.

- [39] 邹丛荣. 沂蒙山区沂源县土壤可蚀性因子(K)研究[D]. 南京:南京林业大学,2017.
- [40] 杨建国,安韶山,郑粉莉. 宁南山区植被自然恢复中土壤团聚体特征及其与土壤性质关系[J]. 水土保持学报,2006(1):72-75,98.
- [41] 朱秋莲,程曼,安韶山,等. 宁南山区植被恢复对土壤团聚体特征及腐殖质分布的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(4):247-251,257.
- [42] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学,2014,35(12):4695-4704.