

中国土壤碱解氮含量与影响因子的空间关系研究

朱梓弘^{1,2}, 朱同彬^{1*}, 杨霖^{1,3}, 罗柳玲¹, 谢银财¹

1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 海南大学热带农林学院, 海南 海口 570228

摘要: 不同地区之间的地域差异, 使以往针对土壤碱解氮与影响因子关系的研究存在着相互矛盾的结论。为比较不同环境条件下土壤碱解氮含量空间分异潜在主导因子的一致性, 基于现有的 GIS 数据, 采用地理探测器的研究方法, 分别以全国及自然区划尺度为研究单位分析中国土壤碱解氮含量空间分异的潜在主导因子。结果表明, (1) 从全国尺度上看, 土地利用方式与气温及降水的共同作用主导了中国土壤碱解氮含量的空间分异过程。不同土地利用方式下土壤碱解氮含量的差异大致表现为林地 (147 mg·kg⁻¹)>草地 (113 mg·kg⁻¹)>耕地 (103 mg·kg⁻¹)>水域 (95 mg·kg⁻¹)>建设用地 (92 mg·kg⁻¹)>未利用地 (55 mg·kg⁻¹)。在此基础上, 气温与降水的变化进一步改变了地表的环境条件与植被状况, 使得土壤碱解氮含量在大尺度上发生更复杂的变化。(2) 从自然区划尺度上看, 影响土壤碱解氮含量空间分异的潜在主导因子存在一致性, 但同时也存在差异。中国东部湿润季风区土壤碱解氮主要受气温影响。而在西部干旱区, 降水以及坡度对碱解氮的作用相对较大。此外, 在地形条件复杂的亚热带常绿阔叶林带、温带森林草原带及青藏高原区, 海拔高度的变化对土壤碱解氮含量的影响最显著。因此, 该研究认为影响土壤碱解氮含量空间分异的潜在主导因子会因其所处环境条件的不同而存在明显差异, 但这些主导因子在一定程度上均能够有效反映各自然区划带的基本环境特征。

关键词: 土壤碱解氮; 地理探测器; 综合自然区划; 主导因子

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2019.11.008

中图分类号: K903; X144

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2019) 11-2199-09

引用格式: 朱梓弘, 朱同彬, 杨霖, 罗柳玲, 谢银财, 2019. 中国土壤碱解氮含量与影响因子的空间关系研究[J]. 生态环境学报, 28(11): 2199-2207.

ZHU Zihong, ZHU Tongbin, YANG Lin, LUO Liuling, XIE Yingcai, 2019. The spatial relationship between soil alkeline-nitrogen content and environmental factors in China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 28(11): 2199-2207.

土壤碱解氮主要包括矿质无机态氮及分子结构简单的有机态氮, 是土壤中能够直接被植被吸收利用的氮素形式, 也是衡量土壤供氮能力, 反映土壤氮素有效性的重要指标 (中国科学院南京土壤研究所, 1978)。土壤碱解氮含量受多种因子的影响, 存在着明显的空间分异。近年来, 众多学者针对土壤碱解氮含量的空间变异及其影响因子开展了大量研究 (罗由林等, 2015; 袁知洋等, 2015; 张振明等, 2009), 但并未形成统一的结论。从地形影响上看, 已有研究指出土壤碱解氮含量与海拔高度呈显著正相关 (李相盈等, 2016; 袁知洋等, 2015; 张振明等, 2009), 但有部分学者却认为海拔高度的增加并不利于碱解氮积累 (胡玉福等, 2008; 唐杰等, 2017)。从气候因子来看, 针对气温降水与碱解氮含量相互关系的研究中, 同时也存在正相关

(赵书军等, 2010) 与负相关 (施春健等, 2007; 明姣等, 2013) 两种结论。从不同土地利用方式上看, 林地受人为扰动少, 植被覆盖度高, 土壤碱解氮含量一般高于其他用地方式 (胡玉福等, 2008; 许冬梅等, 2007), 但在耕地、果园等用地方式下土壤碱解氮含量超过林地的现象同样也被报导过 (罗由林等, 2015)。实际自然环境中, 各因子之间通常都是以复杂的方式共同作用于土壤 (白军红等, 2006; 刘培静等, 2012), 不同因子之间影响模式的不同与影响强弱的差异可能是导致研究结论相互矛盾的重要原因。

以往研究多局限于县域尺度 (罗由林等, 2015)、小流域尺度 (刘培静等, 2012; 许冬梅等, 2007) 或单一的地貌类型 (胡玉福等, 2008; 唐杰等, 2017), 不同地区之间存在明显的地域差异,

基金项目: 国家重点研发计划专题“断陷盆地土壤障碍消减与质量提升技术” (2016YFC0502503); 中国地质科学院基本科研业务费专项“岩溶区土壤氮关键转化过程研究” (YYWF201637)

作者简介: 朱梓弘 (1993 年生), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤氮素循环。E-mail: 2020170011@cugb.edu.cn

***通信作者:** 朱同彬 (1983 年生), 男, 副研究员, 主要研究方向为岩溶区土壤氮循环及环境效应研究。E-mail: zhutongbin@gmail.com

收稿日期: 2019-07-20

导致影响土壤碱解氮含量空间分异的潜在主导因子可能会因为环境条件的不同而有差别,使得针对某一个地区的研究结论难以适用于其他地区。为比较不同环境条件下潜在主导因子的一致性与差异性,本研究进一步引入综合自然区划带的概念。综合自然区划是依据自然环境条件及其组成成分的相似性与差异性,将地表具有相似的自然过程与自然现象的地区划分为同一个区域的分区方法(伍光和等, 2008)。同一自然带通常具有相类似的自然环境条件,如水热组合、植被特征、水文过程等,以综合自然区划带作为研究单位,可以有效反映不同地域之间环境条件的差异。在此基础上,本研究利用现有的 GIS 数据,采用地理探测器的分析方法(王劲峰等, 2017),分析主导中国土壤碱解氮含量空间分异的影响因子,探讨在不同自然区划带中潜在主导因子的差异,旨在为土壤肥力保持及土地生产资源合理利用提供理论依据。

1 研究方法与数据处理

1.1 研究方法

本研究采用王劲峰等(2017)研发的地理探测器,分析主导土壤碱解氮含量空间分异的影响因子。地理探测器是探究地物空间分异规律,揭示其潜在驱动因子的统计学方法,该方法通过比较地物 Y 与影响因子 X 空间分布格局的一致性,来判断影响因子对地物的影响程度大小。基本模型如下所示:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{i=1}^L N_L \sigma_L^2 \quad (1)$$

其中, q 为影响因子 X 对地物 Y 的影响程度大小, q 值介于 0—1 之间, q 值越大表明影响因子对地物 Y 的影响程度越大; L 为影响因子 X 离散化处理后的分区; N_L 与 N 分别为分区 L 的样本量与全区总样本量; σ_L^2 与 σ^2 分别为分区 L 与全区的方差。

此外,考虑到不同影响因子之间存在两两交互作用,还需要评估影响因子 X_1 与 X_2 共同作用对碱解氮含量空间分异的影响程度,因此在模型(1)的基础上,本文采用地理探测器中的“交互作用探测模型”研究方法,计算两种因子交互时 q 值大小,即 $q(X_1 \cap X_2)$ 。地理探测器模型计算通过 GeoDetector 软件完成(<http://www.geodetector.org/>)。

1.2 数据源与数据处理

中国土壤碱解氮数据来源于寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>)所提供的面向陆面模拟的中国土壤数据集(Wei et al., 2013)。该数据由二次土壤普查的 1:100 万中国土壤图及 8 595 个土壤剖面数据汇编而成,数据为栅格格式,空间分辨率 1 km (图 1)。中国综合自然区划数据

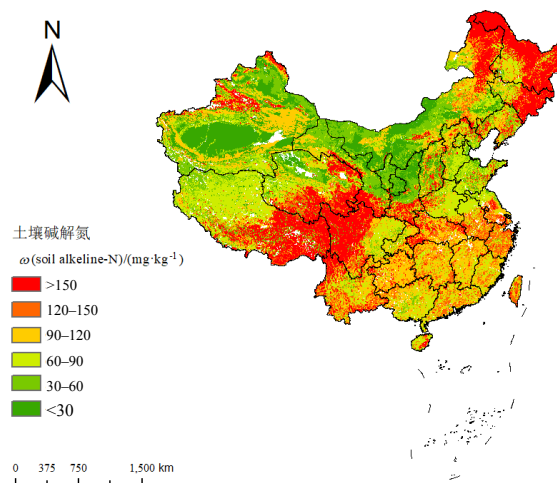


图 1 中国土壤碱解氮质量分数空间分布

Fig. 1 The distribution of soil alkaline-nitrogen mass fraction in China

由黄秉维所编制的 1:3 200 万《中国综合自然区划图》(黄秉维, 1958),通过 ArcGIS 软件进行空间校准、坐标投影定义与矢量化处理而获得(图 2)。

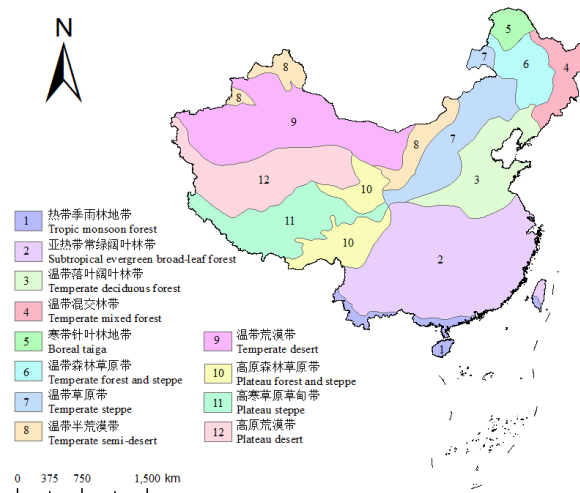


图 2 中国综合自然区划(黄秉维, 1958)

Fig. 2 The comprehensive physical regionalization in China

海拔高度数据为地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)所提供的 SRTM DEM 数字高程模型,坡度与坡向数据由 SRTM DEM 经 ArcGIS 软件换算得到。气象数据由国家地球系统科学数据共享服务平台(<http://www.geodata.cn/>)提供,其中气温数据为空间分辨率 1.00 km 的月平均气温数据集,降水数据为空间分辨率 10 km 的 CGCM3 模拟中国逐月降水量数据集。此外,土地利用数据来源于寒区科学数据中心,数据为分辨率 1.00 km 的中国地区土地覆盖综合数据集,数据共包含 6 种

主要的用地模式,即森林、草地、耕地、水域、建设用地与未利用地。

1.3 数据处理

为提取栅格数据信息,本文借助 ArcGIS 网格化功能 (Fishnet),以 5 km×5 km 网格为基本统计单元,在研究区内进行网格化采样提取土壤碱解氮含量,中国全区共计样点总量 42 613 个,并将其分别划分至热带季雨林带、亚热带常绿阔叶林带、温带落叶阔叶林带等 12 个自然带中。地理探测器适用于自变量为类型变量,因变量为数值变量的分析,因此在应用模型前,需要借助 ArcGIS 重分类功能 (Reclassify) 对海拔高度、坡度、坡向、气温、降水等连续型变量数据进行离散化处理。离散化处理分别在全区及各自然区划带中进行,处理采用分位数分类原则 (Quantile),共分为 6 类。最后,借助 ArcGIS 的栅格信息提取功能 (Extract) 完成土壤碱解氮信息与环境指标的匹配,并通过地理探测器 Geodetector 软件,分别计算各自然区划带 q 值与交互作用 q 值,以评估不同环境条件下各因子对土壤碱解氮含量空间分异的影响程度。此外,数据的拼接、裁剪、投影变化、整合换算、重采样等预处理过程也通过 ArcGIS 软件完成。

2 结果与分析

土壤碱解氮含量受多种因子的共同影响。本研究选取海拔高度、坡度、坡向、气温、降水、土地利用方式等 6 项影响因子指标 (图 3),以探究在不同环境条件下土壤碱解氮含量空间分异的潜在主导因子。整体而言 (图 4),各因子对土壤碱解氮的影响程度由大到小依次为土地利用方式 (0.16)、坡度 (0.09)、降水 (0.09)、气温 (0.08)、海拔高度 (0.08) 及坡向 (0.00);土地利用方式主导了中国土壤碱解氮含量的空间分异过程,基本表现为:林地 (147 mg·kg⁻¹)>草地 (113 mg·kg⁻¹)>耕地 (103 mg·kg⁻¹)>水域 (95 mg·kg⁻¹)>建设用地 (92 mg·kg⁻¹)>未利用地 (55 mg·kg⁻¹) (图 5)。各因子交互作用中,影响程度最大的分别是土地利用∩气温 (0.31)、土地利用∩降水 (0.30)、海拔高度∩降水 (0.27)、海拔高度∩气温 (0.26) (图 6)。由此看出,从全国尺度上分析,土地利用方式及其与气候因子的共同作用可能是主导中国土壤碱解氮含量的空间分异过程的重要因子。气温、降水与碱解氮含量的多元回归分析结果表明,在 6 种土地利用方式中,土壤碱解氮含量均表现为与气温呈显著的负相关关系,与降水呈显著的正相关关系 (表 1)。这说明,气候因子在土地利用的基础上提高了土壤碱解氮含量的空间异质性,使中国土壤碱解氮含量的空间分异过程进一步复杂化。

表 1 土壤碱解氮与气温及降水量的多元回归分析

Table 1 The Multiple regression analysis of soil alkali-hydrolyzed nitrogen with temperature and precipitation

类型 Type	多元回归模型 Multiple regression equation	<i>R</i>	<i>F</i>
全国 Nationwide	AN=0.41P-0.41t	0.43	1 713.00**
林地 Forest	AN=0.22P-0.66t+0.58	0.65	1 298.56**
草地 Grassland	AN=0.45P-0.12t	0.41	488.83**
耕地 Cropland	AN=0.24P-0.46t+0.06	0.31	149.31**
水域 Water	AN=0.41P-0.27t-0.14	0.31	16.70**
建设用地 Construction	AN=0.71P-0.43t	0.29	10.86**
未利用地 Unused land	AN=0.48P-0.12t-0.28	0.50	527.48**

其中, AN 为土壤碱解氮含量, P 为年降水量, t 为年平均气温, **表示多元回归分析的结果在 99%的水平下是显著的

AN represent soil alkali-hydrolyzed content, P represent the mean annual precipitation and t represent the annual average temperature. ** means that the results of the regression analysis are significant at the 99% level.

自然区划带下的探测结果表明 (表 2), 土壤碱解氮含量空间分异的潜在主导因子因其所处环境条件的不同而有明显的差异。

在东部湿润的季风气候区, 气温主导了土壤碱解氮的空间分异过程, 尤其在热带季雨林带与温带混交林带, 气温对土壤碱解氮含量的影响程度分别达到了 0.19 与 0.12。其次为海拔高度, 在亚热带常绿阔叶林带与温带森林草原带, 海拔高度是土壤碱解氮含量变化的主导因子, 影响力程度分别为 0.12 与 0.28。从因子的交互作用上看, 气温∩海拔、气温∩降水是主导中国东部湿润地区土壤碱解氮含量的空间分异的重要因子。

在西北干旱半干旱地区, 坡度及降水主导了土壤碱解氮的空间分异过程。在温带半荒漠带与温带荒漠带土壤碱解氮空间分异的潜在主导因子为坡度, 其影响程度分别达到了 0.39 与 0.20; 而在温带草原带, 土壤碱解氮空间分异的潜在主导因子为降水, 其影响程度达 0.27。从交互因子上看, 降水∩气温及海拔高度∩气温对土壤碱解氮含量的影响程度最大。

在青藏高原地区, 海拔高度与降水量主导了高原区土壤碱解氮含量空间分异。在高原东部的森林草原带, 土壤碱解氮含量空间分异的潜在主导因子为海拔高度, 交互主导因子为海拔高度∩气温; 在高原中部及西部的草原带与荒漠带, 海拔高度与降水的共同主导了土壤碱解氮的空间分异过程。

3 讨论

本研究旨在论证土壤碱解氮含量空间分异的潜在主导因子是否会因其所处环境条件的不同而

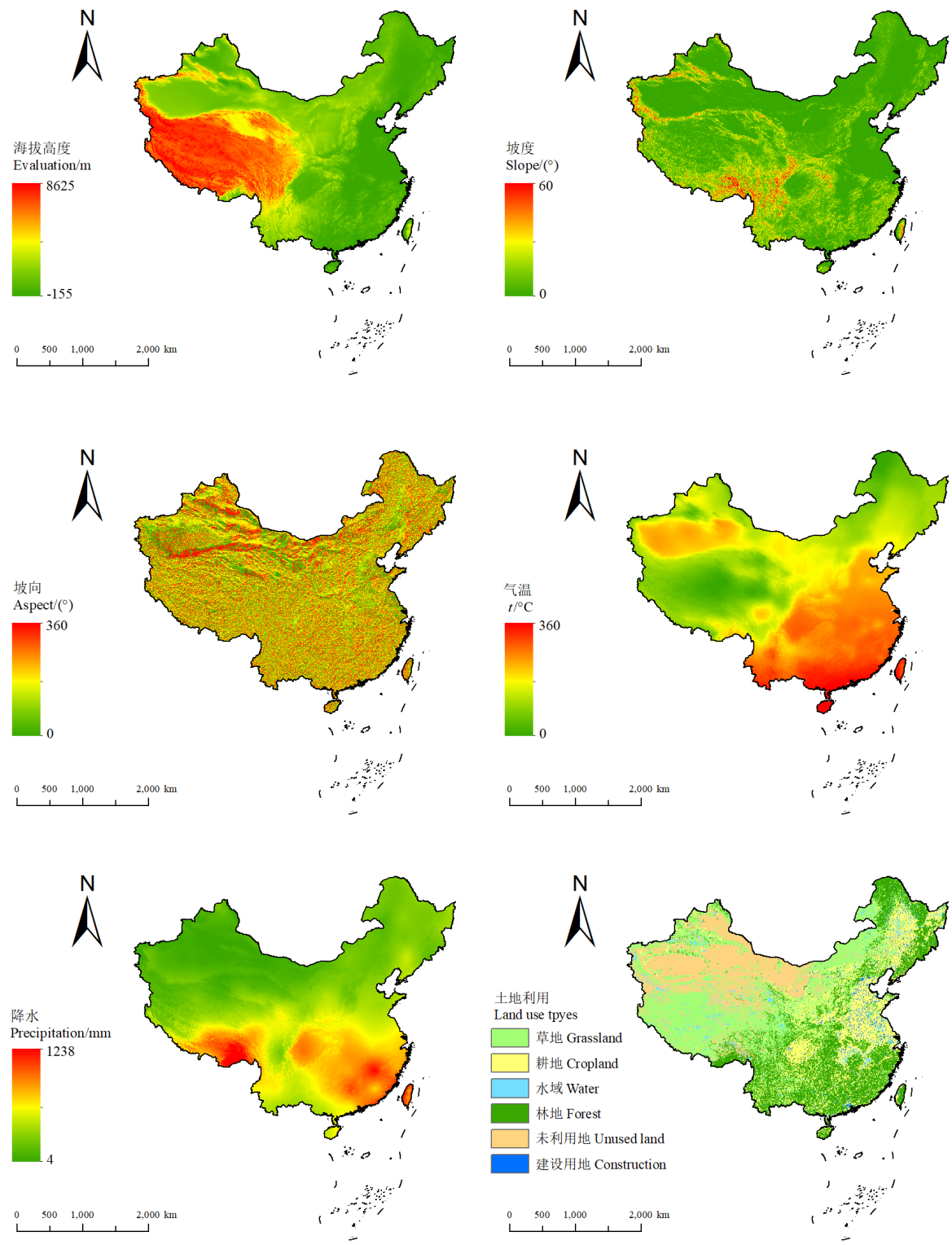


图 3 影响土壤碱解氮含量的潜在影响因子

Fig. 3 The potential environmental factors affecting soil alkaline-nitrogen content

有差异。因此,本研究基于现有 GIS 数据,采用地理探测器的研究方法,进一步量化各影响因子与土壤碱解氮含量的空间关系,比较各因子之间影响程度的差异以及不同环境条件下碱解氮含量潜在主导因子的差别。

3.1 全国尺度下土壤碱解氮含量的潜在主导因子

从全国尺度上看,土地利用方式主导了中国土壤碱解氮的空间分异过程。基于全国范围内的基本统计结果进一步证明了不同土地利用方式下土壤碱解氮含量在明显的差异。一般认为,土壤碱解氮

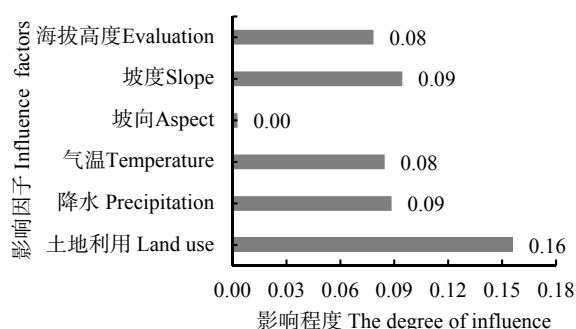


图4 各因子对土壤碱解氮含量的影响程度

Fig. 4 The influence of various factors on soil alkali-nitrogen content

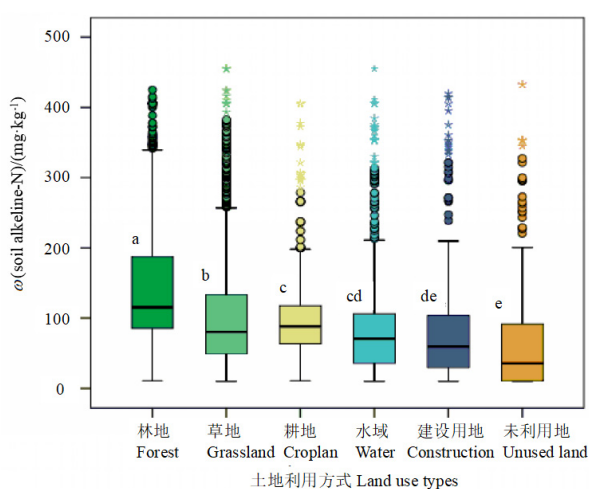


图5 不同土地利用方式下土壤碱解氮质量分数

Fig. 5 Soil alkali-nitrogen mass fraction in different land use types

含量取决于土壤有机质的数量与熟化程度(刘世全等, 2004), 有机质含量高的土壤往往能够保持较高的碱解氮含量(刘世全等, 2004; Zhang et al., 2004)。在不同的土地利用方式下, 由于其地表的

覆被条件、生物量、凋落物数量及受人为扰动程度的不同, 土壤有机质的丰缺状况与熟化程度存在明显的差异, 因此不同土地利用

方式之间土壤碱解氮含量也具有一定的差别(张池等, 2013; 郑杰炳等, 2008)。林地与草地的覆被程度较高, 且受人为扰动的影响少, 大量的植被凋落物与腐殖质进入土壤, 使土壤的有机质含量大幅度提高(吴乐知等, 2007), 因而林地与草地土壤可以维持充足的碱解氮含量以供应植被生长。相比之下, 耕地受人为扰动较为频繁, 一方面, 人为的开垦、除草等活动破坏了地表植被, 导致植被凋落物与腐殖质数量大量减少(吴乐知等, 2007); 另一方面, 翻耕、松土等过程改变了土壤的微生物环境, 加快了有机质的分解, 从而导致耕地土壤的有机质含量下降(Gregorich et al., 1998; 胡玉福等, 2008), 因此在有机质含量相对较低的耕地土壤中碱解氮含量也比较低。与耕地土壤类似, 地表植被的状况同样也限制了水域与建设用地土壤碱解氮的积累, 并使其含量保持着较低的水平(艾尤尔等, 2014; 张宏伟等, 2008)。此外, 未利用地主要分布于西部及西北部地区, 多为沙漠、戈壁等荒地, 基本没有植被覆盖, 其恶劣的环境条件与植被状况极大地抑制了有机质的积累过程(王绍强等, 2000), 因此在6种土地利用方式中, 未利用地的土壤碱解氮含量处于最低的水平。值得注意的是, 不同土地利用方式下土壤碱解氮含量虽然存在显著的差异, 但仅以土地利用方式为线索仍然难以解释中国土壤碱解氮复杂的空间分异规律。本研究还进一步统计了不同因子之间的交互作用对土壤碱解氮含量的影响程度。交互因子的分析结果表明, 土地利用方式与气温及降水之间的共同作用对中国土壤碱解氮含量的空间变化有较为显著的影响。

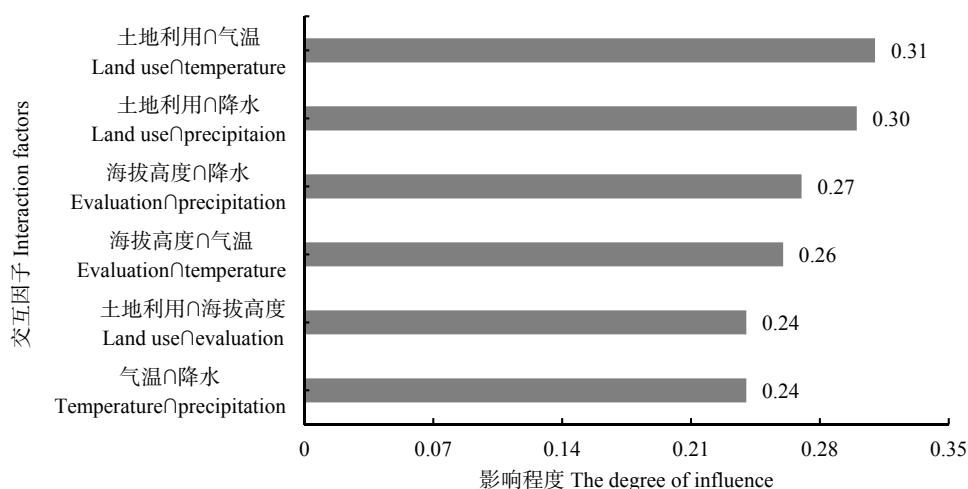


图6 各影响因子及其交互作用对土壤碱解氮含量的影响程度

Fig. 6 The influence of factors and their interactions on soil alkali-nitrogen content

表 2 不同自然区划带土壤碱解氮含量的潜在主导因子与交互主导因子

Table 2 The dominant factors and interactive dominant factors of soil alkeline-nitrogen in different natural regionalization

气候区	自然区划带	主导因子	q 值	交互主导因子	q 值
Climate region	Comprehensive physical regionalizations	Dominant factors	q value	Dominant interaction factors	q value
热带、亚热带季风区 The tropical and subtropical monsoon	热带季雨林带 The tropical monsoon forest	气温 Temperature	0.19	气温∩降水 Temperature∩Precipitation	0.30
	亚热带常绿阔叶林带 The subtropical evergreen broad-leaf forest	海拔高度 Elevation	0.12	海拔∩气温 Elevation∩Temperature	0.18
温带季风区 The temperate monsoon	温带落叶阔叶林带 The temperate deciduous forest	气温 Temperature	0.08	气温∩海拔/气温∩坡度 Temperature∩Precipitation/Temperature∩Slope	0.11
	温带混交林带 The temperate mixed forest	气温 Temperature	0.12	气温∩海拔/气温∩降水 Temperature∩Elevation/Temperature∩Precipitation	0.25
	寒带针叶林带 The boreal taiga	气温 Temperature	0.07	气温∩降水 Temperature∩Precipitation	0.17
	温带森林草原带 The temperate forest and steppe	海拔高度 Elevation	0.28	海拔∩气温/降水∩气温 Elevation∩Temperature/Precipitation∩Temperature	0.35
	温带草原带 The temperate steppe	降水 Precipitation	0.15	降水∩气温 Precipitation∩Temperature	0.27
温带干旱半干旱区 The temperate arid and semi-arid regions	温带半荒漠带 The temperate semi-desert	坡度 Slope	0.39	海拔∩气温 Elevation∩Temperature	0.55
	温带荒漠带 The temperate desert	坡度 Slope	0.20	坡度∩气温/海拔∩气温 Slope∩Temperature/Elevation∩Temperature	0.30
	高原森林草原带 The plateau forest and steppe	海拔高度 Elevation	0.08	海拔∩气温 Elevation∩Temperature	0.20
青藏高原区 Tibet plateau	高原草甸草原带 The plateau steppe	降水 Precipitation	0.14	降水∩海拔 Precipitation∩Elevation	0.21
	高原荒漠带 The plateau desert	海拔高度 Elevation	0.11	海拔∩降水 Elevation∩Precipitation	0.18

气温、降水与碱解氮含量的多元回归分析表明, 气温的降低与降水量的增加会提高土壤的碱解氮含量(表 1)。一般认为, 降水量的增加有利于植被的增长与土壤养分的积累, 而温度的升高则会促进有机质的分解, 不利于养分保持(解宪丽等, 2004)。因此, 在降水充沛且年平均气温较低的地区, 土壤通常具有较为丰富的碱解氮。事实上, 由图 1 也可以发现, 分布于东部湿润地区的林地土壤, 其碱解氮含量由南向北随温度的减少而呈现出逐渐上升的变化趋势; 而分布于北部及高原地区的草地土壤, 其碱解氮含量由西向东随着降水量的增加而逐渐增加, 这种空间分异模式与以往针对中国土壤有机质含量空间分异的研究结论相一致(解宪丽等, 2004; 王绍强等, 2000)。本研究认为, 不同土地利用方式之间的差异确定了中国土壤碱解氮含量的空间分异的基本模式, 而在此基础上, 气候因子的空间变化进一步影响了土壤碱解氮含量, 并使其在大区尺度上发生更为复杂的变化。

3.2 不同自然区划带土壤碱解氮含量的潜在主导因子分析

从自然区划带得尺度上看, 土地利用方式对土壤碱解氮含量空间分异的影响程度明显降低。这可

能是由于研究尺度缩小, 土地利用方式的空间异质性也逐渐降低, 即单一化, 从而降低了土地利用方式对土壤碱解氮空间分异的影响程度。例如, 亚热带常绿阔叶林带与寒带针叶林带林地面积分别占区划带总面积的 52.8%与 80.7%, 而在温带落叶阔叶林带中耕地面积占比达到 59.1%。这种单一化的土地利于方式难以解释大尺度条件下土壤碱解氮复杂的变异形式, 因此在很大程度上影响了地理探测器的统计结果。

在不同的自然区划带中, 影响土壤碱解氮含量空间分异的潜在主导因子既存在一致性, 也存在明显差别。在东部湿润季风区, 气温及其与降水的交互作用主导了土壤碱解氮含量的空间分异过程。特别是在温带季风气候区, 土壤碱解氮含量的空间分异基本由气温主导, 呈现出随纬度的增加而不断增加的变化趋势。气温降低促进有机质积累, 使土壤可以保持较高的碱解氮含量, 这与以往针对东北地区土壤碱解氮的观测结果相同(施春健等, 2007)。与全国尺度的统计结果不同, 东部季风区土壤碱解氮含量主要取决于气温, 而降水对土壤碱解氮含量仅仅起到调节和控制的作用。这可能是由于东部地区气候湿润, 植被数量多且类型丰富, 充足的植被

凋落物降低了土壤氮源的空间差异性,相反地,季风区各自然带的带幅宽广,气温南北差异显著,有机质的分解速率受气温的影响而有较大差异,因而土壤碱解氮含量呈现出随温度的变化而变化的特征。不同的是,在亚热带常绿阔叶林带与温带森林草原带中,土壤碱解氮含量并非由气温主导,反而受海拔高度的影响较大。一般认为,地形条件可以影响地表水热条件的再分配过程从而影响土壤碱解氮含量(胡玉福等,2008;李相盈等,2016;罗由林等,2015)。与其他自然区划带相比,亚热带常绿阔叶林带与温带森林草原带地形起伏较大,区内涵盖了平原、丘陵、山地等多种地貌类型。复杂的地形条件使地表的水热状况进一步复杂化,从而造成土壤碱解氮的积累与分解速率在不同的海拔高度下呈现明显的空间分异。因此,在这两个自然区划带中,海拔高度的变化可以更好地解释土壤碱解氮含量的空间分异规律。此外,海拔高度还可能通过影响土地利用方式影响土壤碱解氮含量(赵越等,2018),例如高海拔山地森林广泛分布且受人为扰动少,土壤碱解氮含量高,而低海拔平原多被开垦为耕地并不利于碱解氮的积累。因此,在地形条件复杂的自然带中,海拔高度的变化使得多种影响因子在较大的空间尺度上发生较为复杂分异,从而代替气温、降水成为主导土壤碱解氮含量空间分异过程的关键因素。

西部干旱、半干旱区,土壤碱解氮含量的空间分异主要受降水与坡度控制。水分是影响旱区土壤碱解氮来源的关键因素,一方面,降水量决定了旱区地表的植被状况以及输入土壤的凋落物量(王新源等,2013);另一方面,充足降水可以改善旱区土壤的水分状况,提高土壤微生物活性,从而控制凋落物分解与有机质的积累(Jacobson et al., 1998)。因此,在温带草原带,土壤有机质含量随着降水量的下降而下降,从而导致土壤碱解氮从总体上呈现出由东至西逐渐降低的变化特征。不同的是,在温带荒漠带与温带半荒漠带中,土壤碱解氮空间分异的主导因子为坡度,交互因子主要为海拔 $\cap$ 气温。地形因子对温带荒漠带与温带半荒漠带土壤碱解氮的空间分异起到了重要的作用,这与以往的研究结论相类似(塞牙热木等,2017)。由图1可以发现,阿尔泰山、天山山脉、昆仑山脉及祁连山脉等高寒山区是温带荒漠与半荒漠带土壤碱解氮的主要高值区域,相反在地形平坦的塔里木盆地、准噶尔盆地中土壤的碱解氮含量较低,基本在 $60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下。温带荒漠带与半荒漠带深处内陆,气候干燥,大部分地区的年降水量在 50 mm 以下,地表植被状况差,土壤保水保肥能力弱,土壤碱解氮

量含量基本处于较低的水平。但在天山、阿尔泰山等地区,其绝对的海拔高度使得这些地区可以接收到东亚季风与盛行西风从高空携带而来的水汽,为植被的生长提供了充足的水源(伍光和等,2008)。丰富的植被状况与高海拔条件下的低温环境促进了土壤有机质的积累,使得碱解氮可以被有效保持。因此,在温带荒漠与半荒漠带,地形条件决定了水分的空间再分配过程,从而主导土壤碱解氮含量的空间变化。

在西南部青藏高原地区,影响土壤碱解氮含量空间分异的潜在主导因子同样也因其所处环境条件的不同而表现出明显差异。在高原东部湿润的森林草原带,海拔与气温共同主导了土壤碱解氮的空间分异过程,但在气候干旱的高原草甸草原带与高原荒漠带,海拔与降水的共同作用对土壤碱解氮含量的影响较大。土壤碱解氮的积累主要受地表水热条件与植被状况的制约。但在青高原地区,其绝对的海拔高度使气温、降水及植被等因素随高度发生有规律的变化,从而导致高原土壤碱解氮含量在垂直方向上发生明显的分异(刘世全等,2004;马和平等,2013)。事实上,刘世全等(2004)的研究也已经证明了高原地区土壤碱解氮含量确实存在着明显的垂直地带性变化,具体表现为随海拔高度的增加呈先增后减的垂直地带性变化特征。高海拔条件下的低温环境在一定程度上有利于土壤碱解氮的积累(马和平等,2013),但在海拔超过 5000 m 的地区,由于气候酷寒,土壤冻融交替频繁,部分地区甚至被冰雪覆盖,这种严酷的环境极大地限制了植被的生长(顾国安,1993),使得土壤碱解氮含量无法得到充分的积累。因此,在青藏高原的部分极高山区,土壤碱解氮含量呈出随海拔高度的增加而不断降低的变化趋势。

4 结论

整体而言,土地利用方式主导中国土壤碱解氮含量的空间分异过程,主要表现为:林地($147.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>草地($113.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>耕地($103 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>水域($95.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>建设用地($92.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>未利用地($55.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。在土地利用方式的基础上,土壤碱解氮含量还受到气温与降水量的调控,具体表现为土壤碱解氮含量随着气温的增加而降低,同时随着降水量的增加而增加。

在东部湿润季风区,土壤碱解氮含量的潜在主导因子主要为气温,但在地形复杂、地貌类型多样的亚热带常绿阔叶林带及温带森林草原带中,海拔高度代替气温成为影响土壤碱解氮空间分异的潜在主导因子。在西部干旱半干旱区,降水与坡度对土壤碱解氮含量的空间分异起到了重要的作用。其

中,降水主导了温带森林草原带土壤碱解氮含量的空间变化。同时,坡度与海拔通过改变地表的水热条件,控制着温带荒漠与温带半荒漠带土壤碱解氮含量的变化。在青藏高原东部森林草原带,温度对土壤碱解氮含量的影响较大,而在高原中部及西部干旱地区,海拔与降水的共同作用主导了土壤碱解氮含量的空间分异。

本研究认为影响土壤碱解氮含量空间分异的潜在主导因子会因其所处环境条件的不同而有所差异,但这些主导因子在一定程度上能够反映各自然区划带的基本环境特征,这为解释土壤养分状况对影响因子的响应模式存在明显的地域差异提供了强有力的支持。

参考文献:

- GREGORICH E G, GREER K J, ANDERSON D W, et al., 1998. Carbon distribution and losses: Erosion and deposition effects [J]. *Soil and Tillage Research*, 47(3-4): 291-302.
- JACOBSON K M, JACOBSON P J, 1998. Rainfall regulates decomposition of buried cellulose in the Namib Desert [J]. *Journal of Arid Environment*, 38(4): 571-583.
- WEI S G, DAI Y J, LIU B Y, et al., 2003. A China data set of soil properties for land surface modeling [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(2): 212-224.
- ZHANG Y G, JIANG Y, LIANG W J, et al., 2004. Vertical variation and storage of nitrogen in an aquic brown soil under different land uses [J]. *Journal of Forest Research*, 15(3): 192-196.
- 艾尤尔·亥热提, 王勇辉, 海米提·依米提, 2014. 艾比湖湿地土壤碱解氮的空间变异性分析[J]. *土壤*, 46(5): 819-824.
- GHAYUR G, WANG Y H, HAMIT Y, 2014. Spatial variability of soil available nitrogen in Ebinur Lake Wetland [J]. *Soil*, 46(5): 819-824.
- 白军红, 崔保山, 杨志峰, 等, 2006. 向海沼泽湿地土壤碱解氮含量的季节变化特征研究[J]. *中国生态农业学报*, 14(1): 115-117.
- BAI J H, CUI B S, YANG Z F, et al., 2006. Seasonal variation of alkaline hydrolysis N in Marsh soils in Xianghai Wetlands [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 14(1): 115-117.
- 顾国安, 1993. 浅谈昆仑山区的寒冻土和寒漠土[J]. *干旱区研究*, 10(4): 57-62.
- GU G A, 1993. Preliminary study on frost-calcareous soils and frost desert soils of the Kunlun Mts [J]. *Arid Zone Research*, 10(4): 57-62.
- 胡玉福, 邓良基, 张世熔, 等, 2008. 川中丘陵区典型小流域土壤氮素空间变异特征及影响因素研究[J]. *水土保持学报*, 22(3): 70-81.
- HU Y F, DEN L J, ZHANG S R, et al., 2008. Study on spatial variability and its influence factors of soils nitrogen in typical small watershed in the hilly region of the middle Sichuan [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 22(3): 70-81.
- 黄秉维, 1958. 中国综合自然区划的初步草案[J]. *地理学报*, 24(4): 348-363.
- HUANG B W, 1958. A preliminary draft of comprehensive natural zoning in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 24(4): 348-363.
- 李相盈, 张维勇, 刘峰, 等, 2016. 不同海拔高度下梵净山土壤碳、氮、磷分布特征[J]. *水土保持研究*, 23(3): 19-24.
- LI X Y, ZHANG W Y, LIU F, et al., 2016. The Distribution Characteristics of Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorous at Different Altitude in Fanjingshan Mountain [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 23(3): 19-24.
- 刘培静, 王克勤, 李苗苗, 等, 2012. 元谋干热河谷不同土地利用类型雨季后土壤养分变化[J]. *中国水土保持*, 36(10): 56-59.
- LIU P J, WANG K Q, LI M M, et al., 2012. Variations of soil nutrient of different types of land use before and after rainy season in Yuanmou Dry-hot Valley [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 36(10): 56-59.
- 刘世全, 高丽丽, 蒲玉琳, 等, 2004. 西藏土壤有机质和氮素状况及其影响因素分析[J]. *水土保持学报*, 18(6): 54-67.
- LIU S Q, GAO L L, PU Y L, et al., 2004. Analysis on status of soil organic matter and N nutrient and their influence factors in Tibet [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 18(6): 54-67.
- 罗由林, 李启权, 王昌全, 等, 2015. 川中丘陵区域土壤氮素空间分布特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 36(2): 652-660.
- LUO Y L, LI Q Q, WANG C Q, et al., 2015. Spatial variability of soil nitrogen and related affecting factors at a county scale in hilly Area of Mid-Sichuan basin [J]. *Environmental Science*, 36(2): 652-660.
- 马和平, 郭其强, 刘合满, 等, 2013. 西藏色季拉山东麓垂直带土壤碳氮分布特征及其影响因素[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 41(1): 91-96.
- MA H P, GUO Q Q, LIU H M, et al., 2013. Distribution and affecting factors of soil organic carbon and total nitrogen along the altitudinal belt in the Eastern Sejila Mountain of Tibet [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 41(1): 91-96.
- 明姣, 赵允格, 许明详, 等, 2013. 黄土丘陵区不同降水量带生物结皮对土壤氮素的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 19(1): 102-110.
- MING J, ZHAO Y G, XU M X, et al., 2013. Impacts of biological soil crusts on soil nitrogen in different rainfall regions in hilly areas of the Loess Plateau, China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 19(1): 102-110.
- 塞牙热木·哈力甫, 阿克拜尔·伊拉洪, 宋瑞清, 等, 2017. 察布查尔县草原土壤微生物量与土壤理化性质相关性研究[J]. *草业学报*, 26(9): 36-44.
- SAIYAREMU H, AIKEBAIER Y, SONG R Q, et al., 2017. Correlations between soil microbial biomass and soil physical and chemical properties in Grassland in Chabuchaer county [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 26(9): 36-44.
- 施春健, 庄秋丽, 李琪, 等, 2007. 东北地区不同纬度农田土壤碱解氮的剖面分布[J]. *生态学杂志*, 26(4): 501-504.
- SHI C J, ZHUANG Q L, LI Q, et al., 2007. Profile distribution of alkali-hydrolyzed nitrogen in farmland soils of northeast China along a latitudinal gradient [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 26(4): 501-504.
- 唐杰, 王昌全, 李冰, 等, 2017. 川中丘陵区土壤有机质和碱解氮空间变异特征研究[J]. *中国农业科技导报*, 19(6): 124-130.
- TANG J, WANG C Q, LI B, et al., 2017. Spatial variability and its influencing factors of soil organic matter and alkaline nitrogen in central hilly area of Sichuan [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 19(6): 124-130.
- 王劲峰, 徐成东, 2017. 地理探测器:原理与展望[J]. *地理学报*, 72(1): 116-133.
- WANG J F, XU C D, 2017. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 72(1): 116-133.
- 王新源, 赵学勇, 李玉霖, 等, 2013. 环境因素对干旱半干旱区凋落物分解的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 24(11): 3300-3310.
- WANG X Y, ZHAO X Y, LI Y L, et al., 2013. Effects of environmental factors on litter decomposition in arid and semi-arid regions: A review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24(11): 3300-3310.
- 王绍强, 周成虎, 李克让, 等, 2000. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. *地理学报*, 55(5): 533-544.
- WANG S Q, ZHOU C H, LI K R, et al., 2000. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 55(5): 533-544.
- 伍光和, 王乃昂, 胡双熙, 等, 2008. 自然地理学[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社.
- WU G H, WANG N A, HU S X, et al., 2008. *Physical Geography* [M]. Fourth Edition. Beijing: Higher Education Press.
- 吴乐知, 蔡祖聪, 2007. 农业开垦对中国土壤有机碳的影响[J]. *水土保持学报*, 21(6): 118-121.
- WU L Z, CAI Z C, 2007. Effect of agricultural cultivation on soil organic carbon in China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 21(6): 118-121.

- 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等, 2004. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报, 41(1): 35-43.
- XIE X L, SUN B, ZHOU H Z, et al., 2004. Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 41(1): 35-43.
- 许冬梅, 张世熔, 李婷, 等, 2007. 金堂环溪河流域土壤氮素含量及其影响因素分析[J]. 土壤通报, 38(6): 1092-1095.
- XU D M, ZHANG S R, LI T, et al., 2007. Analysis on soil nitrogen content and influence factors in Jintang county of the Huanxi River Valley [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 38(6): 1092-1095.
- 袁知洋, 邓邦良, 李志, 等, 2015. 武功山草甸土壤碱解氮含量分布影响因素研究[J]. 江苏农业科学, 43(5): 318-320.
- YUAN Z Y, DEN B L, LI Z, et al., 2015. Study on factors influencing distribution of soil alkali-hydrolysable nitrogen content in Wugong Mountain meadow [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 43(5): 318-320.
- 张池, 高云华, 陈旭飞, 等, 2013. 不同土地利用方式对赤红壤理化性质的综合影响[J]. 自然资源学报, 28(12): 2140-2149.
- ZHANG C, GAO Y H, CHEN X F, et al., 2013. Comprehensive effects of different land uses on physical and chemical properties of lateritic red soil [J]. *Journal of Natural Resource*, 28(12): 2140-2149.
- 赵越, 罗志军, 赵杰, 等, 2018. 南方丘陵区耕地土壤养分空间特征及其影响因素[J]. 浙江农业学报, 30(6): 1035-1043.
- ZHAO Y, LUO Z J, ZHAO J, et al., 2018. Spatial characteristics and influencing factors of soil nutrients in hilly region of south China [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 30(6): 1035-1043.
- 张宏伟, 魏忠义, 王秋兵, 2008. 沈阳城市土壤全钾和碱解氮的空间变异性[J]. 应用生态学报, 19(7): 1517-1521.
- ZHANG H W, WEI Z Y, WANG Q B, 2008. Spatial variability of soil total K and available N in Shenyang urban area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19(7): 1517-1521.
- 张振明, 余新晓, 徐娟, 等, 2009. 不同植被类型土壤碱解氮空间变异性及预测[J]. 北京林业大学学报, 31(5): 12-18.
- ZHANG Z M, YU X X, XU J, et al., 2009. Spatial variability and prediction of soil available nitrogen of different vegetation types [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 31(5): 12-18.
- 郑杰炳, 王子芳, 谭显龙, 等, 2008. 丘陵紫色土区土地利用方式对土壤剖面理化性质影响研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 30(3): 101-106.
- ZHENG J B, WANG Z F, TAN X L, et al., 2008. Effects of land use patterns on the physico-chemical properties of the soil profile in purple hilly areas [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science)*, 30(3): 101-106.
- 中国科学院南京土壤研究所, 1978. 土壤理化性质分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社.
- Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, 1978. Soil properties analysis [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers.
- 赵书军, 袁家富, 张新然, 等, 2010. 鄂西南烟区土壤供氮特性影响因素研究[J]. 中国生态农业学报, 18(6): 1157-1162.
- ZHAO S J, YUAN J F, ZHANG X R, et al., 2010. Factors affecting soil nitrogen supply in tobacco fields in southwest Hubei [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 18(6): 1157-1162.

The Spatial Relationship between Soil Alkeline-nitrogen Content and Environmental Factors in China

ZHU Zihong^{1,2}, ZHU Tongbin¹, YANG Lin^{1,3}, LUO Liuling¹, XIE Yingcai¹

1. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Karst Dynamics Laboratory, MLR & GZAR, Guilin 541004, China;

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

3. Institute of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 570228, China

Abstract Due to the regional differences among different study regions, previous studies had a lot of contradictory conclusions on the relationship between soil alkeline-nitrogen content and influencing factors. In order to compare the consistency and difference, the potential dominant factors of the spatial distribution on soil alkeline-nitrogen content were analyzed by the geographical detector, which was based on the GIS data under the national scale and the natural divisions scale. The results of this study were as follows: (1) In the national scale, the comprehensive role of land use patterns and climate conditions led to the nationwide soil alkaline-nitrogen space differentiation. The difference of soil alkeline-nitrogen content under different land use patterns was generally manifested as forest ($147 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>grassland ($113 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>cropland ($103 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>water ($95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>construction>unused land ($55 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). On the basis of land use, temperature and precipitation further affected the environment and vegetation conditions on the surface, which made the distribution of soil alkeline-nitrogen more complex on a national scale. And (2) in different comprehensive physical regionalization, the potential dominant factors affecting the spatial distribution of soil alkeline-nitrogen existed consistent, but there were also significant differences. In humid monsoon region of eastern China, soil alkeline-nitrogen was mainly affected by temperature. However, in the western arid region, precipitation and slope had a relatively large influence on soil alkeline-nitrogen. Moreover, in the area with complicated topographic conditions, such as subtropical evergreen broad-leaved forest, temperate forest steppe and Qinghai-Tibet Plateau, the variation of elevation had the most important effect on soil alkeline-nitrogen content. Therefore, this study was concluded that the spatial distribution of soil alkal-hydrolyzed nitrogen shared the consistent potential factors while also significantly different existed. These dominant factors can effectively reflect the basic environmental characteristics of each natural belt to a certain degree.

Key words: soil alkeline-nitrogen; geographical detector; comprehensive physical regionalization; dominant factors