

# 祁连山典型流域青海云杉林土壤氮磷钾空间变异性研究

张瑞浩<sup>1</sup>, 赵维俊<sup>2</sup>, 王 坤<sup>3</sup>, 敬文茂<sup>2</sup>, 张丽霞<sup>1</sup>, 于丹丹<sup>4</sup>, 刘淑英<sup>1\*</sup>

(1. 甘肃农业大学 资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院

甘肃省祁连山森林生态系统国家定位观测研究站, 甘肃 张掖 734000;

3. 北京理工大学 珠海学院 中美国际学校, 广东 珠海 519088; 4. 辽宁景华工程咨询有限公司, 辽宁 沈阳 110029)

**摘 要:** 基于祁连山中段排露沟流域海拔 2 600~3 300 m 的带状青海云杉林中 0~10、10~20、20~40 cm 的土壤 TN、TP、TK 的测定分析数据, 运用经典统计学、地统计学的方法对其土壤 TN、TP、TK 含量的空间变异特征及空间分布特点进行研究。结果表明, 1) 研究区内土壤 TN 含量为 1.34~8.98 g·kg<sup>-1</sup>, 土壤 TP 含量为 0.46~1.12 g·kg<sup>-1</sup>, 土壤 TK 含量为 9.75~24.17 g·kg<sup>-1</sup>; 不同土层土壤 TN、TP、TK 变异系数为 13.26%~35.47%, 均属中等程度变异; 2) 10~20 cm TP 的块金系数为 0.617, 属于中等空间相关性, 其余块金系数均<0.25, 具有强烈空间相关性; 3) 克里格插值结果显示, 土壤 TN、TP 含量随海拔的升高而升高, 土壤 TK 含量随海拔升高而降低。不同土层土壤 TN、TP、TK 含量的空间变异性特征, 与海拔、土壤母质及云杉林枯落物等结构性因素有关。

**关键词:** 土壤 TN; 土壤 TP; 土壤 TK; 空间变异; 祁连山; 青海云杉林

**中图分类号:** S791.18

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-7461(2023)02-0017-08

## Spatial Variability of Soil Nitrogen, Phosphorus and Potassium in *Picea crassifolia* Forest in the Typical Watershed of the Qilian Mountains, Northwestern China

ZHANG Rui-hao<sup>1</sup>, ZHAO Wei-jun<sup>2</sup>, WANG Kun<sup>3</sup>, JING Wen-mao<sup>2</sup>, ZHANG Li-xia<sup>1</sup>,  
YU Dan-dan<sup>4</sup>, LIU Shu-ying<sup>1\*</sup>

(1. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China;

2. Gansu Qilian Mountain Water Source Conservation Forest Research Institute, National Positioning Observation and Research Station of Qilian Mountain Forest Ecosystem in Gansu Province, Zhangye 734000, Gansu, China;

3. College of Global Talents, Beijing Institute of Technology, Zhuhai 519088, Guangdong, China;

4. Liaoning Jinghua Engineering Consulting Corporation, Shenyang 110029, Liaoning, China)

**Abstract:** We conducted a research on soil total nitrogen, total phosphorus and total potassium based on the measurement and analysis of the data from the three soil layers at the depths of 0—10, 10—20, and 20—40 cm from *Picea crassifolia* forest, located at altitudes of 2 600—3 300 m in the Pailugou watershed in the middle portion of the Qilian Mountain. The spatial variations and distribution characteristics of soil total nitrogen, phosphorus, and potassium were analyzed by adopting classical statistics and geostatistics methods. The results showed that 1) the contest ranges of soil total nitrogen, phosphorus, and potassium were 1.34—8.98, 0.46—1.12, and 9.75—24.17 g·kg<sup>-1</sup>, respectively, with the variation coefficients of 13.26%—35.47%, which belonged to medium level. 2) The Nugget coefficient of soil total phosphorus at the depth of 10—20 cm was 0.617, which belonged to medium spatial correlation, and the other Nugget

收稿日期: 2022-01-09 修回日期: 2022-03-12

基金项目: 国家自然科学基金资助(32060247); 高校基本科研业务费专项资金(10898XZ20201016-1, 10898XZ20201016-1)。

第一作者: 张瑞浩。研究方向: 森林土壤学、生态学。E-mail: 960195310@qq.com

\* 通信作者: 刘淑英, 教授。研究方向: 土地资源管理、土壤学。E-mail: lshy826@126.com

coefficients were less than 0.25, indicating significant solid spatial correlation. 3) Kriging interpolation results showed that the contents of total soil nitrogen and phosphorus increased with the increase of altitude, and the content of total soil potassium decreased with the increase of altitude. The spatial variability of soil total nitrogen, phosphorus and potassium contents in different soil layers was related to structural factors such as altitude, soil parent material and spruce forest litter.

**Key words:** soil total nitrogen; soil total phosphorus; soil total potassium; spatial variation; the Qilian Mountains; *Picea crassifolia*

土壤 N、P、K 是陆地生态系统的重要养分库,是构成陆地生物化学物质循环的重要环节,同时又是植物生长发育必需的 3 种营养物质,在整个森林生态系统的自然演替过程中起着举足轻重的作用<sup>[1]</sup>。土壤 N 是森林生态系统的重要限制营养元素,对提高植物生产力,增强森林生态系统稳定性等有着重要影响;土壤 P、K 在植物体的生长发育,代谢繁殖过程中有着不可或缺的作用。因此,深入研究土壤 N、P、K 含量的空间变异规律不仅有利于全面认识土壤差异信息,同时对阐明土壤与植物之间的关系也具有重要意义。

土壤作为一种演化过程和自身形态都特别复杂的自然综合体,在漫长的成土过程中,由于不同的气候、时间、成土母质、地形、生物等因素的共同作用下,使得土壤的理化性质具有明显的空间特异性,土壤空间异质性是生态系统的基本特征<sup>[2-4]</sup>。近年来,大多学者<sup>[5-9]</sup>对不同土壤养分的空间特征开展了大量研究。吕世丽等<sup>[10]</sup>在牛背梁山保护区研究了不同海拔森林土壤养分特征发现,土壤 TN、TP、TK 含量均与海拔之间存在显著相关性,土壤养分含量与有机质积累有着密切联系。张忠华等<sup>[11]</sup>在研究喀斯特地貌的森林土壤养分空间异质性中提到,土壤 TP、TK 等有强烈的空间自相关,其变异主要由气候、地形、土壤母质等自然因素引起。苏松锦等<sup>[12]</sup>对格氏栲天然林土壤养分空间异质性研究中发现,格氏栲天然林各土壤养分含量差异与地形、植被异质性有关,进而影响土壤养分的空间分布格局。张继平等<sup>[13]</sup>在井冈山保护区对森林土壤养分含量的空间变化规律进行研究发现,不同森林类型的土壤养分空间分布变化规律与海拔具有相关性,不同海拔的土壤类型也不尽相同。

目前对土壤 N、P、K 的相关研究多集中于大尺度、不同森林类型和不同土壤类型等方面,对于高寒山地小流域单一树种区域的土壤 N、P、K 的空间异质性研究较少。我国不同森林类型的土壤 N、P、K 异质性不同学者<sup>[14-17]</sup>已进行了丰富的研究,从总体上看,研究区域多集中于西南林区、东北林区、东南林区,但是对西北地区高寒区分布的高寒针叶林的

相关研究却鲜有报道。鉴于此,本研究以祁连山排露沟流域青海云杉林为研究对象,通过实地调查采样、室内测验分析,结合地统计分析学、经典地统计学和 3S 技术,明确该流域青海云杉林土壤 TN、TP、TK 含量的空间分布特征及变异性,并结合 DEM 数据,深入探讨不同土层土壤 TN、TP、TK 含量在垂直结构的变化规律和水平结构的变异特征,以期揭示小流域尺度下青海云杉林土壤 TN、TP、TK 含量的变异规律,为研究祁连山青海云杉林森林土壤结构、土壤分类制图和森林生态建设提供参考和理论依据。

## 1 研究区概况

以祁连山中段排露沟流域青海云杉林为研究对象。排露沟流域位于祁连山国家级自然保护区内大野口水库东南方向(38°32′—38°33′N, 100°17′—100°18′E),海拔 2 600~3 800 m,属于大陆性高寒山地气候,根据祁连山西水生态站统计数据显示,该流域年平均降水量为 300~500 mm,大部分降雨集中在 5—9 月,年平均气温 -0.6~2.0 °C,年平均日照时数为 1 893 h,日辐射总量平均为 110.30 kW·m<sup>-2</sup>。草地主要分布在海拔 2 700~2 900 m 的阳坡和半阳坡,土壤类型是山地栗钙土;灌丛草甸主要分布在海拔 2 600~3 800 m 的亚高山地带,土壤类型是灌丛草甸土;建群种青海云杉呈条状分布在海拔 2 600~3 300 m 的阴坡和半阴坡,研究区面积为 1.38 km<sup>2</sup>,研究区内土壤类型主要为山地灰褐土,土壤厚度为 60~80 cm,林下灌木优势种主要有金露梅(*Potentilla fruticosa*)、北极果(*Arctous alpinus*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)等,林下草本优势种主要有珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、苔草(*Carex breviculmis*)等<sup>[18-21]</sup>。流域内自然条件相对复杂,水热条件差异性大,地形起伏大,植被类型和土壤类型形成了明显的垂直分布带。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集与分析

基于野外实地考察,根据祁连山排露沟流域内

的地貌特征并结合林分结构特征,在  $1.38 \text{ km}^2$  的带状青海云杉林内,选择有代表性的地段采集土壤样品。在  $2\,600 \sim 3\,300 \text{ m}$  海拔范围内,每隔  $100 \text{ m}$  设置 1 个海拔梯度段,由于每个海拔梯度段长度和宽度不等,研究区域内地形复杂,按照常规规则网格采样实施难度大,因此结合不同海拔段的地形因素,采取非等距不规则网格采样法,采样点之间距离  $150 \sim 200 \text{ m}$ ,尽量保证样点分布合理,共布设采样点 56 个(图 1);在每个采样点清理苔藓枯落后挖掘 1 个  $1 \text{ m}$  宽的土壤剖面,土样采集 3 层,即  $0 \sim 10$ 、 $10 \sim 20$ 、 $20 \sim 40 \text{ cm}$ ,共收集 168 个土样,每层取 3 个重复,将植物根系、石块等杂质清除,混合均匀后采用密封袋密封,共带回实验室自然风干、过筛后测定每份土壤样品的 TN、TP、TK 含量;TN 测定采用半微量凯氏法,TP 测定采用酸溶钼锑抗比色法,TK 测定采用酸溶火焰光度计法。具体测定方法参照国家林业和草原局发布的中国林业行业标准《森林土壤分析方法 GB7830-7892—87》<sup>[22]</sup>。采样同时利用手持 GPS 北斗定位仪记录采样点经纬度坐标、海拔、土壤类型等信息。底图是由祁连山西水生态站提供,经过处理验证得到;DEM 数据源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>)。

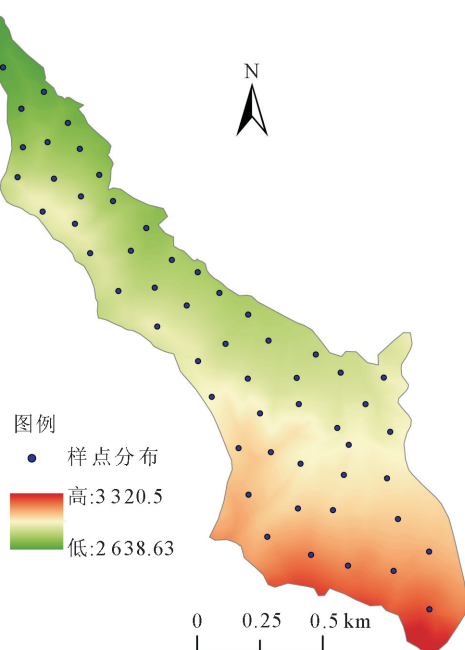


图 1 研究区及采样点分布

Fig. 1 Distribution map of study area and sampling points

## 2.2 数据处理

运用统计软件 SPSS 25.0 进行对土壤 TN、TP、TK 含量的描述性统计分析、正态分布检验;再利用 GS+9.0 软件对处理后的数据进行地统计学分析,分析得到半方差函数的最优模型参数,选取 ArcGIS 10.4.1 软件运用克里格最优插值法对土壤 TN、TP、

TK 进行空间插值,绘制得到排露沟流域青海云杉林土壤 TN、TP、TK 含量的空间分布图。

描述性统计分析包括最大值、最小值、均值、标准差、变异系数等,其中,变异系数反映数据的离散程度,根据变异系数的划分等级,变异系数  $< 0.1$  属于低等程度变异,变异系数在  $0.1 \sim 1$  属于中等程度变异,变异系数  $> 1$  属于高等程度变异<sup>[23]</sup>。正态分布检验采用单样本柯尔莫可洛夫-斯米洛夫检验(Kolmogorov-Smirnov test),服从正态分布的样本,符合地统计学分析要求。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同土层土壤 TN、TP、TK 含量描述性统计分析

从表 1 可以看出,研究区内各土层中土壤 TK 含量最高,其次是 TN,最后是 TP,TK 含量最大值为  $24.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,TN 含量最大值为  $8.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,TP 含量最大值为  $1.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤 TN 含量均值随着土壤深度增加而减少, $0 \sim 10 \text{ cm}$  土层土壤 TP 含量大于  $10 \sim 20$ 、 $20 \sim 40 \text{ cm}$  土层,但  $10 \sim 20$ 、 $20 \sim 40 \text{ cm}$  土层土壤 TP 含量均值相同,而土壤 TK 含量均值随着土壤深度增加变化不大;土壤 TK 在不同土层深度最大值出现在  $0 \sim 10 \text{ cm}$  土层,但  $0 \sim 10 \text{ cm}$  土层均值最小。不同土层土壤 TN、TP、TK 的变异系数在  $0.1 \sim 1$ (表 1),均属于中等程度变异。其中土壤 TN 的变异系数为  $0.31 \sim 0.35$ ,高于土壤 TP、TK 含量的变异系数,其中土壤 TP 含量变异系数最小为  $0.13 \sim 0.18$ ,同时表层土壤 TN、TP、TK 含量变异系数比下层略大,但均属于中等程度变异。运用非参数检验方法对各土层土壤 TN、TP、TK 含量进行 K-S 检验,检验结果  $P$  均  $> 0.05$ ,表示各土层数据均符合正态分布,可以直接进行地统计学分析。

### 3.2 不同土层土壤 TN、TP、TK 含量的空间变异特征值

表 2 是不同土层土壤 TN、TP、TK 含量变异函数拟合的结果及相关参数,图 2 不同土层土壤 TN、TP、TK 含量半方差函数的最优模型图。由表 2 和图 2 可以看出,大多数模型的拟合程度较好,其决定系数  $R^2$  均  $> 0.8$ ,其中  $0 \sim 10 \text{ cm}$  土壤 TK 最小为  $0.856$ ,拟合模型均为高斯模型。其中, $C_0$  为块金值,块金值主要说明由于随机性因素造成的空间变异类型; $(C+C_0)$  为基台值,是表示系统内总变异。块金值/基台值( $C_0/(C+C_0)$ )称作块金系数,是用于表示区域化变量空间自相关性的程度。若比值  $< 25\%$ ,变量具有强烈的空间相关性,其变异影响因素

的结构性因素占主导地位;若比值在 25%~75%,则变量具有中等的空间相关性,由结构性因素与随机性因素共同作用影响其空间变异;若比值>75%时,则变量空间相关性较弱,变异由随机变异组成,不适合使用空间插值<sup>[24-25]</sup>。不同土层土壤 TN、TP、TK 含量的块金系数多数<25%,说明具有强

烈的空间相关性,受到结构性因素影响较强,由此可见,研究区内不同土层土壤 TN、TP、TK 含量受人为干扰因素较小。不同土层土壤 TN、TP、TK 含量均处于中等以上空间自相关水平,可以使用克里格插值实现对土壤 TN、TP、TK 含量进行较好的空间模拟预测。

表 1 不同土壤深度土壤 TN、TP、TK 含量描述性统计(N=56)

Table 1 Descriptive statistics of total nitrogen,phosphorus and potassium at different soil depths(N=56)

土壤养分	土壤深度/cm	最小值/(g·kg <sup>-1</sup> )	最大值/(g·kg <sup>-1</sup> )	均值/(g·kg <sup>-1</sup> )	标准差	变异系数	K-S 检验	分布类型
TN	0~10	1.85	8.98	4.56	1.58	0.35	0.057	正态分布
	10~20	1.34	6.89	3.68	1.30	0.35	0.052	正态分布
	20~40	1.35	4.55	3.05	0.94	0.31	0.062	正态分布
TP	0~10	0.57	1.12	0.76	0.14	0.18	0.163	正态分布
	10~20	0.46	0.85	0.67	0.11	0.16	0.200	正态分布
	20~40	0.50	0.85	0.65	0.09	0.13	0.051	正态分布
TK	0~10	9.75	24.17	16.66	3.41	0.20	0.053	正态分布
	10~20	9.96	23.08	16.88	3.14	0.19	0.200	正态分布
	20~40	11.00	23.58	16.79	3.35	0.20	0.200	正态分布

表 2 不同土层土壤 TN、TP、TK 含量半方差函数的理论模型及相关参数

Table 2 Theoretical model and related parameters of semivariance function of total nitrogen,total phosphorus and total potassium in different soil layers

土壤养分	土壤深度/cm	理论模型	块金值(C0)	基台值(C+C0)	块金系数C0/(C0+C)	变程 A0/m	决定系数 R <sup>2</sup>	残差平方和
TN	0~10	高斯模型	0.073	2.943	0.025	970	0.919	1.050
	10~20	高斯模型	0.200	3.410	0.059	1 519	0.865	0.825
	20~40	高斯模型	0.010	2.019	0.005	1 325	0.960	0.132
TP	0~10	高斯模型	0.002	0.035	0.046	1 216	0.860	1.58×10 <sup>-4</sup>
	10~20	高斯模型	0.016	0.026	0.617	1 480	0.934	2.06×10 <sup>-5</sup>
	20~40	高斯模型	0.002	0.163	0.011	1 671	0.888	1.04×10 <sup>-5</sup>
TK	0~10	高斯模型	1.430	22.850	0.063	1 395	0.856	52.300
	10~20	高斯模型	1.130	22.250	0.051	1 559	0.905	22.800
	20~40	高斯模型	0.760	22.510	0.034	1 345	0.924	29.900

半方差函数的变程(A0)表明土壤属性因子空间自相关范围的大小,其与观测尺度以及在取样尺度上影响土壤养分各种生态过程相互作用有关<sup>[26]</sup>。超过变程范围空间自相关性将不复存在,其可以作为研究某种属性相似范围的一个准则。由表 2 可以看出,不同土层土壤 TN、TP、TK 的变程(A0)最小为 0~10 cm 土层深度土壤 TN,其值为 970 m,最大为 20~40 cm 土层深度土壤 TP,其中为 1 671 m,土壤 TP 的变程(A0)随着土层深度的增加而呈现出增大的趋势,其变程分别为 1 216、1 480、1 671 m,研究区不同土层土壤 TN、TP、TK 养分含量在这个范围内均存在空间自相关性,研究区内各采样点间距均满足条件,其最佳采样点间距为 800 m,可以看出不同土层土壤 TN、TP、TK 含量具有良好的空间结构性。

3.3 不同土层土壤 TN、TP、TK 含量的空间分布特征

为了更直观地反映出不同土层土壤 TN、TP、TK 含量在研究区内的空间分布特征,根据得出的半方差函数理论模型及相关参数,利用克里格插值法对研究区内土壤 TN、TP、TK 进行空间插值分析,得到不同土层土壤 TN、TP、TK 含量的空间分布图(图 3)。与其他研究方法相比较,克里格插值法可以克服内插中误差难以分析的问题,可以评定参数的空间变异分布以及估算估计参数的方差分布等优点<sup>[27]</sup>。

从图 3 可以看出,在 0~10、10~20、20~40 cm 的土层深度上,研究区内土壤 TN、TP、TK 含量随海拔梯度变化明显,土壤 TN、TP 含量随海拔梯度的升高而逐步增加,土壤 TK 含量随海拔梯度的升



高而降低;在0~10 cm的土层深度上,土壤TN含量最高集中在研究区西南方向,土壤TP含量最高集中在研究区东南方向,林线边缘部分相较于同一海拔段土壤TN、TP含量均较低,不同土壤深度的土壤TK含量空间分布相似,不同土层深度最小值、

最大值的空间分布基本一致。在10~20 cm的土层深度上,土壤TP、TK含量的空间分布基本一致。在20~40 cm的土层深度上,土壤TN、TP含量最高集中在研究区西南方向,在东南方向出现低值区域。

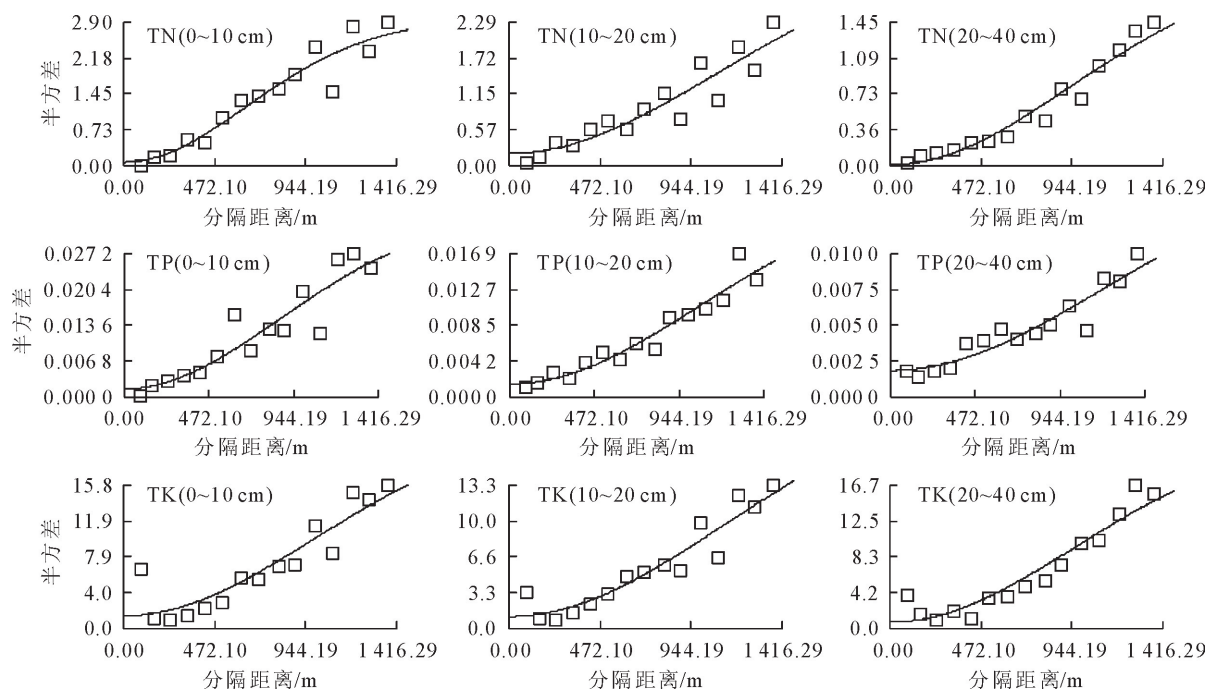


图2 不同土层土壤TN、TP、TK含量半方差函数最优模型

Fig. 2 Optimal model diagram of semi variance function of total nitrogen, phosphorus and potassium in different soil layers

在分析同一种土壤养分的不同深度空间分布情况可以看出,土壤TN、TP含量随土层深度的增加而降低,土壤TK含量随层深度的增加而缓慢增加,并且土壤TN、TP、TK在垂直分布上都有一定的延续性。在0~10 cm和10~20 cm土层深度的土壤TN、TP含量空间分布相似,在20~40 cm土层深度的土壤TN、TP含量空间分布出现较小变化,但总体上是随海拔升高而增加的趋势明显;但不同土层土壤TK含量随海拔升高而降低。

#### 4 结论与讨论

本研究以祁连山青海云杉林为研究对象,通过对不同土层土壤N、P、K数据的分析,进行祁连山青海云杉林土壤N、P、K养分特征的研究,同时结合空间分布数据对不同土层的土壤N、P、K养分状况进行比较分析。

研究区内青海云杉林土壤TN、TP、TK含量变化范围分别是:土壤TN含量 $1.34 \sim 8.98 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , TP含量为 $0.46 \sim 1.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , TK含量为 $9.75 \sim 24.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;土壤空间变异是土壤性质最基本的特征,研究区内不同土层土壤TN、TP、TK含量

均存在空间变异,变异系数在 $13.26\% \sim 35.47\%$ ,属于中等变异程度,在不同土层之间,表层的变异程度较下层相比,也不尽相同。由于诸多环境因素影响研究区内的土壤性质,诸如微地形(坡度、凹凸度)、海拔、凋落物养分归还量、林窗等因素。不同地区、不同森林类型的土壤性质的空间变异性也不相同<sup>[28-32]</sup>。可见,不同地区土壤N、P、K含量的不同变异程度是成土条件限制和森林植被长期作用的结果。

各土层土壤TN、TP、TK含量均具有一定的相关性。各土层块金系数 $<25\%$ ,只有10~20 cm土层土壤TN的块金系数在 $25\% \sim 75\%$ ,说明各层土壤TN、TP、TK含量具有很强的空间变异,土壤TN、TP、TK的空间变异主要由结构性因素引起的,如土壤母质、气候、地形等因素。此研究结果与许多天然林土壤养分空间自相关程度相似<sup>[33-34]</sup>,原因是青海云杉林为天然次生林,植被类型单一,受到外来的干扰较小,植被和生态环境都处于自然演替状态,土壤养分的空间分布主要受到地形、气候及成土母质等因素的影响,其主要受结构性因素影响,随机性因素影响很小。

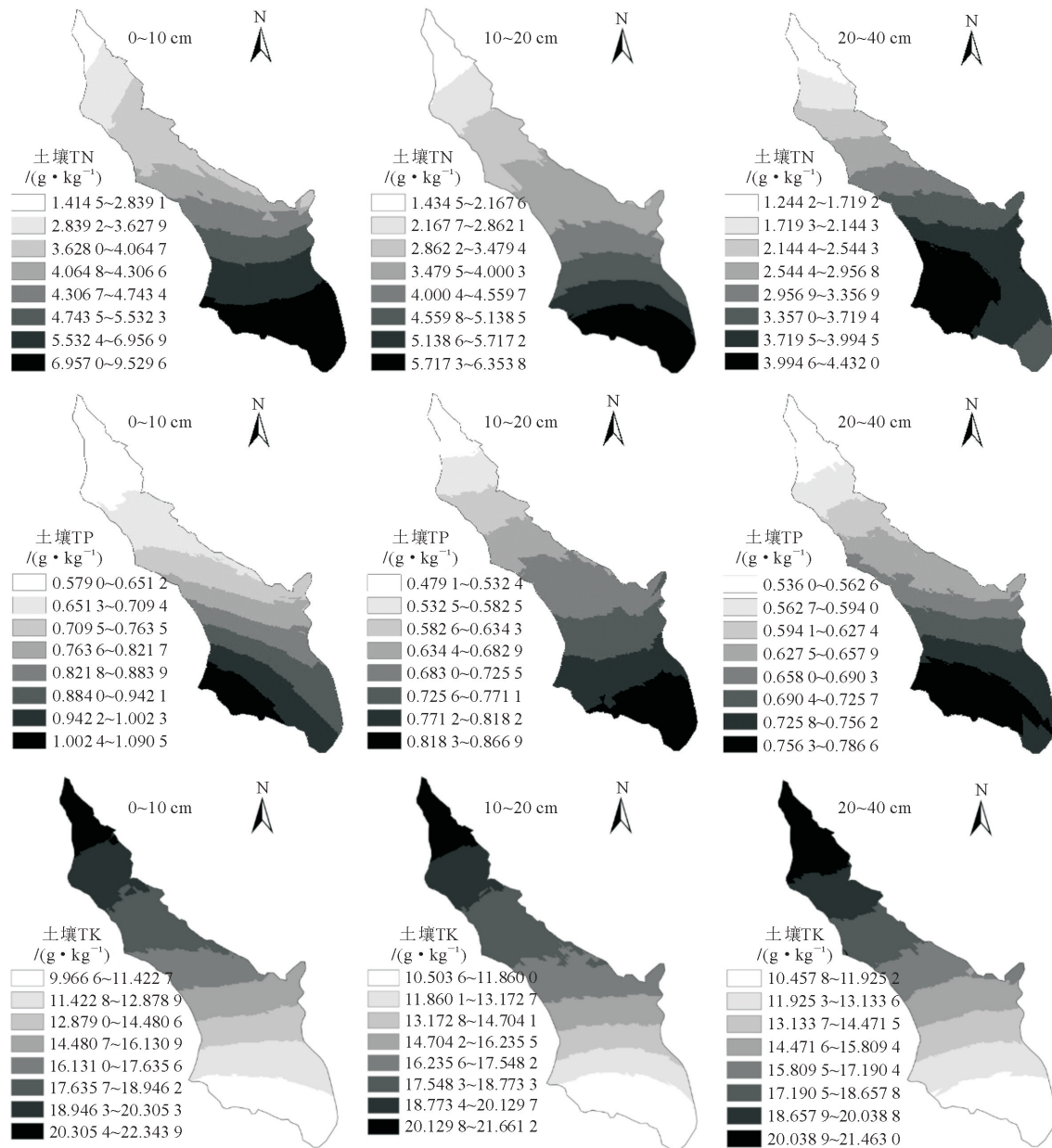


图3 不同土层土壤 TN、TP、TK 含量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of total nitrogen, phosphorus and potassium in different soil layers

土壤 TN、TP、TK 含量均表现出明显的空间分布趋势,但不尽相同。不同土层土壤 TN、TP、TK 含量空间分布特征存在明显的变化规律。

在垂直方向上,随土层深度的增加,同一海拔的土壤 TN 含量呈递减趋势,其变异系数较为稳定。表土层土壤 TP 含量较高,下层土壤 TP 含量减小却较为缓和。土壤 TK 含量表土层较小而下层变化稳定。此变化规律与牛背梁自然保护区森林土壤变化相似<sup>[10]</sup>。由于青海云杉林中土壤表层有大量的植被凋落物,表层有机质丰富,土壤中 N、P 含量与凋落物和植物根系关系密切,土壤表层覆盖大量的植被枯落物,而枯落物是 N、P 的主要补充者,随着土层深度的增加,土壤中有机质含量降低,导致土壤 TN、TP 含量的下降,从而影响了土壤 TN、TP 的垂

直分布特征,出现明显的“表聚现象”。而 K 含量与土壤母质相关,研究区土壤母质富含 K,表层土壤受到土壤有机质的“稀释效应”,加之雨水的淋溶作用,使得土壤表层 TK 含量小于底层。

在水平方向上,研究区内土壤 TN、TP、TK 的空间分布差异较大,其空间分布具有一定的海拔梯度特征。随海拔梯度的升高,不同土层土壤 TN 含量均逐渐降低,主要原因是随着海拔的升高,降雨量增加,土壤含水量增大,加之地表温度相应降低,微生物的分解速度和矿化作用随之减慢和变弱,有机质不易分解,从而使 N 含量大量增加。此外,随海拔的增加不同土层土壤 TP 含量逐渐降低,但深层土壤 TP 在不同海拔变化不大,与 N 供应受大气沉降影响不同,高山植被所需 P,其供应主要依赖成土

过程,针叶林成土过程中土壤腐殖质积累作用较为明显。此变化规律与大青山北坡针叶林和宁夏罗山云杉林变化较为一致<sup>[35-36]</sup>。不同土层土壤 TK 含量随着海拔的升高而降低,这与海拔上升降雨量不断增加所导致的雨水淋溶效应增强有很大的关系,这也证明了土壤 TK 含量表层小于底层的原因,另外,这也可能与土壤有机质的积累量增加,导致土壤 TN、TP 含量增加,土壤 TK 含量减少,这与土壤有机质对矿物 K 有“稀释效应”,总之,土壤中 N、P、K 含量与有机质的积累是密切联系的。

本研究仅利用地统计学原理对青海云杉林土壤 TN、TP、TK 含量的空间变异特征进行了初步研究,对于全面评价祁连山森林生态系统土壤养分的状况,还需要结合地形、土壤类型等因素以及利用其他科学方法进一步研究,将不同尺度、不同研究方法的空间变异分析联系在一起,更好地揭示祁连山森林生态系统土壤养分的空间变异特征。

#### 参考文献:

- [1] 张志华,张锦豪,桑玉强,等. 太行山南麓坡面土壤碳氮空间变异性及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2829-2838.  
ZHANG Z H, ZHANG J H, SANG Y Q, *et al.* Spatial variations and its influencing factors of soil carbon and nitrogen on the southern foot of Taihang Mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(8): 2829-2838. (in Chinese)
- [2] MAESTRE F T, CORTINA J. Spatial patterns of surface soil properties and vegetation in a mediterranean semi-arid steppe [J]. Plant and Soil, 2002, 241(2).
- [3] ZHANG Z, YU D, SHI X, *et al.* Priority selection rating of sampling density and interpolation method for detecting the spatial variability of soil organic carbon in China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(5).
- [4] LI J, OKIN G S, ALVAREZ L, *et al.* Effects of wind erosion on the spatial heterogeneity of soil nutrients in two desert grassland communities[J]. Biogeochemistry, 2008, 88(1).
- [5] 李秀梅,周时学,罗胜军,等. 地统计学在生态学中的应用[J]. 现代农业科技, 2014, 627(13): 245, 247.  
LI X M, ZHOU S X, LUO S J, *et al.* Application of geostatistics in ecology [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2014, 627(13): 245, 247. (in Chinese)
- [6] 文雅,黄宁生,匡耀求. 广东省山区土壤有机碳密度特征及空间格局[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(Supp. 1): 10-18.  
WEN Y, HUANG N S. Pattern and characteristics of soil organic carbon density in mountain area of Guangdong Province, China[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18 (Supp. 1): 10-18. (in Chinese)
- [7] TATENO R, TAKEDA H. Forest structure and tree species distribution in relation to topography-mediated heterogeneity of soil nitrogen and light at the forest floor[J]. Ecological Research, 2003, 18(5).
- [8] 张志坚,刘苑秋,吴春生,等. 基于地统计学和 GIS 的江西省森林土壤养分空间分布特征[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 38-46.  
ZHANG Z J, LIU Y Q, WU C S, *et al.* Spatial distribution characteristics of forest soil nutrients in Jiangxi Province based on geostatistics and GIS [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(1): 38-46. (in Chinese)
- [9] 季蕾,亢新刚,张青,等. 天然云冷杉林土壤养分随林分针阔比变化及其对灌木生物量的影响[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(5): 8-14, 28.  
JI L, KANG X G, ZHANG Q, *et al.* A Study on the shrub biomass and soil nutrient in Jingouling natural spruce-fir forest [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, v. 31; No. 141(5): 8-14, 28. (in Chinese)
- [10] 吕世丽,李新平,李文斌,等. 牛背梁自然保护区不同海拔高度森林土壤养分特征分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(4): 161-168, 177.  
LÜ S L, LI X P, LI W B, *et al.* Forest soil nutrient characteristics at different altitudes in Niubeiliang National Natural Reserve [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2013, 41(4): 161-168, 177. (in Chinese)
- [11] 张忠华,胡刚,祝介东,等. 喀斯特森林土壤养分的空间异质性及其对树种分布的影响[J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1038-1049.  
ZHANG Z H, HU G, ZHU J D, *et al.* Spatial heterogeneity of soil nutrients and its impact on tree species distribution in a Karst forest of Southwest China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(10): 1038-1049. (in Chinese)
- [12] 苏松锦,刘金福,何中声,等. 格氏栲天然林土壤养分空间异质性[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5673-5682.  
SU S J, LIU J F, HE Z S, *et al.* The spatial heterogeneity of soil nutrients in a mid-subtropical *Castanopsis karwakamii* natural forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(18): 5673-5682. (in Chinese)
- [13] 张继平,张林波,王凤玉,等. 井冈山国家级自然保护区森林土壤养分含量的空间变化[J]. 土壤, 2014, 46(2): 262-268.  
ZHANG J P, ZHANG L B, WANG F Y, *et al.* Spatial variation of soil nutrient contents in the Jinggangshan National Nature Reserve[J]. Soils, 2014, 46(2): 262-268. (in Chinese)
- [14] 王子敏. 武夷山不同海拔土壤氮形态的空间异质性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- [15] 邵方丽,余新晓,杨志坚,等. 北京山区典型森林土壤的养分空间变异与环境因子的关系[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(4): 581-591.  
SHAO F L, YU X X, YANG Z J, *et al.* The relationship between environmental factors and spatial variability of soil nutrients for typical forest types in Beijing mountainous area [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(4): 581-591. (in Chinese)
- [16] 刘玲,王海燕,戴伟,等. 长白山低山区森林土壤有机碳及养分空间异质性[J]. 应用生态学报, 2014, 25(9): 2460-2468.  
LIU L, WANG H Y, DAI W, *et al.* Spatial heterogeneity of soil organic carbon and nutrients in low mountain area of Changbai Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 25(9): 2460-2468. (in Chinese)
- [17] 张美娜. 东北云冷杉针阔混交林土壤养分空间变异及影响因

- 素[D]. 北京:北京林业大学,2020.
- [18] 马剑,刘贤德,李广,等. 祁连山北麓中段青海云杉林土壤水热时空变化特征[J]. 干旱区地理,2020,43(4):1033-1040.
- MA J, LIU X D, LI G, *et al.* Spatial and temporal variations of soil moisture and temperature of *Picea crassifolia* forest in north piedmont of central Qilian Mountains [J]. Arid Land Geography, 2020, 43 (4): 1033-1040. (in Chinese)
- [19] 芦倩,李毅,刘贤德,等. 祁连山排露沟流域青海云杉(*Picea crassifolia*)林土壤水分特征[J]. 中国沙漠,2020,40(5):142-148.
- LU Q, LI Y, LIU X D, *et al.* Soil moisture variation characteristics of *Picea crassifolia* forestry in Pailugou Watershed of Qilian Mountains [J]. Journal of Desert Research, 2020, 40 (5): 142-148. (in Chinese)
- [20] 芦倩,李毅,刘贤德,等. 祁连山排露沟流域土壤有机碳空间变异性研究[J]. 水土保持学报,2020,34(5):238-243.
- LU Q, LI Y, LIU X D, *et al.* Study on spatial variability of soil organic carbon in Pailugou catchment of Qilian Mountains [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34 (5): 238-243. (in Chinese)
- [21] 赵维俊,王顺利,孟好军,等. 祁连山排露沟流域青海云杉种群结构与空间分布格局[J]. 中南林业科技大学学报,2018,38(11):75-80.
- ZHAO W J, WANG S L, MENG H J, *et al.* Population structure and spatial distribution pattern of *Picea crassifolia* in Pailugou basin, Qilian Mountains[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(11): 75-80. (in Chinese)
- [22] 张万儒,杨光滢,屠星南. 森林土壤分析方法[M]. 北京:中国标准出版社,2000:74-115.
- ZHANG W R, YANG G Y, TU X N. Forest soil analysis method[M]. Beijing: China Standards Press, 2000: 74-115. (in Chinese)
- [23] 余新晓,张振明,朱建刚. 八达岭森林土壤养分空间变异性研究[J]. 土壤学报,2009,46(5):959-964.
- YU X X, ZHANG Z M, ZHU J G. Spatial variability of soil nutrients of forest in Badaling [J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(5): 959-964. (in Chinese)
- [24] 李旭,王海燕,丁国栋,等. 华北土石山区森林土壤养分空间变异研究[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(6):136-142.
- LI X, WANG H Y, DING G D, *et al.* Spatial variability of forest soil nutrients in rocky mountain area of Northern China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(6): 136-142. (in Chinese)
- [25] 刘迁迁,苏里坦,刘广明,等. 伊犁河谷察南灌区土壤盐分空间变异研究[J]. 干旱区研究,2017,34(5):980-985.
- [26] 张慧文,马剑英,陈发虎,等. 乌鲁木齐雅玛里克山污水灌溉土壤肥力的空间变异研究[J]. 干旱区资源与环境,2008(8):185-191.
- [27] 李亮亮,依艳丽,凌国鑫,等. 地统计学在土壤空间变异研究中的应用[J]. 土壤通报,2005(2):265-268.
- LI L L, YI Y L, LING G X, *et al.* Utilization of Geostatistics in Soil Spatial Variability[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005(2): 265-268. (in Chinese)
- [28] 邱权,李吉跃,王军辉,等. 柴达木盆地不同居群白刺土壤养分空间变异性[J]. 西北林学院学报,2014, v. 29; No. 127(3): 15-20, 52.
- QIU Q, LI J Y, WANG J H, *et al.* Spatial variability and distribution of soil nutrients in different nitraria tangutorum populations in Tsaidam Basin[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(3): 15-20, 52. (in Chinese)
- [29] 杨家慧,谭伟,冯艳. 马尾松人工林土壤养分空间分布特征及其与地形因子的相关性分析[J]. 西南林业大学学报:自然科学,2020,40(4):23-29.
- YANG J H, TAN W, FENG Y. Spatial distribution characteristics of soil nutrients and the correlation with topographic factors in *Pinus massoniana* plantation[J]. Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences, 2020, 40 (4): 23-29. (in Chinese)
- [30] 徐武美,宋彩云,李巧明. 西双版纳热带季雨林土壤养分空间异质对乔木树种多样性的影响[J]. 生态学报,2015,35(23):7756-7762.
- XU W M, SONG C Y, LI Q M Relationship between soil resource heterogeneity and tree diversity in Xishuangbanna tropical seasonal rainforest, Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23): 7756-7762. (in Chinese)
- [31] 张瑜,徐子棋,杨献坤,等. 吉林省山地丘陵区典型坡面水土保持措施适宜性研究[J]. 森林工程,2021,37(6):25-33,38.
- [32] 杨布朗,胡兴宜,彭守亚,等. 栎树柏木混交种植模式对土壤转化酶活性和碳氮含量的影响[J]. 森林工程,2021,37(3):12-20.
- [33] 王淑彬,徐慧芳,宋同清,等. 广西森林土壤主要养分的空间异质性[J]. 生态学报,2014,34(18):5292-5299.
- WANG S B, XU H F, SONG T Q, *et al.* Spatial heterogeneity of the main nutrients in Guangxi forest soils[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18): 5292-5299. (in Chinese)
- [34] 叶彦辉,宋西德,张永,等. 黄土丘陵区林草景观界面土壤养分分布特征和空间变异性研究[J]. 西北林学院学报,2007,85(3):1-6.
- YE Y H, SONG X D, ZHANG Y, *et al.* Distribution characteristics and spatial variability of soil nutrients at the forest-land-grassland interface in Hilly Region of Loess Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 85(3): 1-6. (in Chinese)
- [35] 李晓佳. 大青山南北坡不同海拔高度表土理化性质研究[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学,2008.
- [36] 梁志奇,魏晓宁,秦伟春,等. 宁夏罗山表层土壤理化性质随海拔高度的变化特征[J]. 林业世界,2018,7(1):19-31.
- LIANG Z Q, WEI X N, QIN W C, *et al.* Variation pattern of physicochemical properties along altitudes of Luoshan Mountain in Ningxia[J]. World Journal of Forestry, 2018, 7(1): 19-31. (in Chinese)