

doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0010

Tang Cuiwen, Su Yanke, Wang Guoya, *et al.* Vertical zonation of alpine soil processes in Zhagana area of Diebu, Gansu Province [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 84–92. [汤萃文, 苏研科, 王国亚, 等. 甘肃迭部扎尕那地区山地土壤过程的垂直分带性研究 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 84–92.]

## 甘肃迭部扎尕那地区山地土壤过程的垂直分带性研究

汤萃文<sup>1, 2</sup>, 苏研科<sup>1, 2</sup>, 王国亚<sup>3</sup>, 沈永平<sup>4\*</sup>

(1. 兰州交通大学 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 甘肃省科学院 地质自然灾害防治研究所, 甘肃 兰州 730000; 4. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 为了研究迭部扎尕那地区山地土壤过程的垂直分带性, 对不同海拔分布的土壤类型进行垂直分带取样, 并针对不同植被类型和特殊地理因素进行横向取样, 分析土壤的化学成分及其结构. 应用 GIS 软件数字化研究区地形图, 提取海拔、坡度、坡向等地形因子, 结合土地利用资料得到土地利用类型图. 通过采样点数据与数字化地形因子图与土地利用类型图的叠加, 结合属性数据的统计分析, 讨论影响土壤过程垂直分带性各要素的垂直性规律和分布. 结果表明: 有机碳含量和全氮含量呈极好的线性正相关, 并随海拔的升高而增加. 此外, 在同一海拔范围内, 土壤有机碳含量随着土地利用类型和坡向的变化呈规律性变化. 其中, 不同土地利用类型下的土壤有机碳含量依次为有林地>高寒草甸>高覆盖度草地>农村居民点>平原耕地>山地耕地; 不同坡向上, 土壤有机碳含量依次为阴坡>半阴坡>半阳坡>阳坡.

**关键词:** 土壤; 植被; 地形因子; 土壤过程垂直分带; 扎尕那

**中图分类号:** S154.4 **文献标识码:** A

### 0 引言

山地具有浓缩的环境梯度、高度异质化的生境<sup>[1]</sup>, 蕴涵了极为丰富的生态和地理信息, 山地景观的垂直梯度变化对人类生产、生活具有重要影响<sup>[2]</sup>, 对维护区域和全球生态安全及可持续发展具有重要的战略意义<sup>[3]</sup>. 一般在山地随海拔增高, 山地气候、植被、土壤及整个自然地理综合体都发生明显的垂直分异, 形成多种有相互联系的气候带、植被带、土壤带, 形成具有一定排列顺序的结构和功能带谱<sup>[4]</sup>. 由于气温通常随山地高度增加而降低, 降水与空气湿度在一定高度随海拔升高而递增, 受温度、水分条件制约的植被、土壤等也发生相应的变化<sup>[4]</sup>, 这就造成山地垂直带界限对气候变

化特别敏感, 能够比周围低地较早地反映气候变化, 是气候变化早期预警系统, 甚至是气候变化的信号“放大器”<sup>[3]</sup>.

土壤是陆生植物生活的基质, 陆生动物生活的基底, 不仅可为植物提供必需的营养和水分, 而且也是土壤动物赖以生存的栖息场所<sup>[5–7]</sup>. 山地的气候和生物条件, 往往都具有明显的垂直分带的特征, 在这样的条件影响和作用下产生的各种成土过程也具有明显的垂直分带特点, 因而在不同地带出现不同的成土作用组合, 最终形成不同类型的山地土壤<sup>[4]</sup>. 在土壤的众多成分中, 土壤有机质是各种营养特别是氮、磷的重要来源, 由于它具有胶体特征, 能吸附较多的阳离子, 因而使土壤具有保肥力和缓冲性<sup>[8–9]</sup>. 本研究选择甘肃省迭部县的扎尕

收稿日期: 2012-09-16; 修订日期: 2012-12-28

基金项目: 冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201002); 甘肃省教育厅研究生导师计划项目(1104-07); 兰州交通大学“青蓝”人才工程基金项目(QL-08-04A); 兰州交通大学博士后专项基金资助

作者简介: 汤萃文(1973—), 女, 甘肃临夏人, 副教授, 2007 年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获博士学位, 现主要从事景观生态学方面的研究. E-mail: cuiwent73@mail.lzjtu.cn

\* 通讯作者: 沈永平, E-mail: shenyp@lzb.ac.cn

那地区作为研究区域,通过植被调查、土壤分析和气候变化研究,分析土壤成分之间的相关性、不同海拔下土壤成分的垂直变异,并通过对采样点土地利用类型的分析,讨论不同植被对土壤过程的影响,同时分析地形、水文等因子对土壤过程垂直分带性的影响。

## 1 研究区自然地理概况

甘肃省迭部县位于青藏高原东部边缘,是长江重要支流白龙江的发源地之一,也是重要的水源涵养林区。迭部县西南部的迭山扎尕那地区,处于白龙江上游的高山峡谷地带,为秦岭山系的西段,构造上处于迭山断裂带山,白龙江隆起与洮河凹陷的交界带上。在地形和气候带上,扎尕那位于青藏高原、黄土高原和成都盆地三大地形和青藏高寒区、华中华南亚热带湿润区华北暖温带湿润半湿润区及高原边缘湿润带的交汇区。扎尕那山地生物区系复杂,不仅拥有完整的森林生态系统和明显的垂直分布特征,在海拔3 500 m以上还拥有保存完好的古冰川遗迹,是联系我国东部古冰川活动与西部现代冰川活动的枢纽,是解开我国东部第四纪冰川活动的一把钥匙<sup>[10]</sup>。因此,扎尕那作为同类山地生态系统的典型代表,已成为青藏高原东缘高山区从事森林、生态、动物、植物、环保、水文、地质、地理、土壤、气象等学科研究和教学的理想基地。

扎尕那地区在气候分区上属于甘南高寒湿润区,处于大陆性气候与季风气候的过渡带上<sup>[10]</sup>。受境内高山深谷地形和季风的影响,气候垂直分带明显。其主要气候特点是:冬长无夏,春秋相接;冬无严寒、夏无酷暑;雨量集中,春季多风,秋季多雨。据迭部气象站多年观测资料,区内年平均气温 $6.1\sim 7.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最冷月1月平均气温 $-4.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最热月7月平均气温 $15.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,全年无霜期 $126\sim 180\text{ d}$ ,年平均湿度 $61\%$ ,最大冻土深度 $110\text{ mm}$ ,年平均降水量 $625.6\text{ mm}$ ,降水随海拔升高降水呈增加趋势。降水的季节分布不均,春季占 $22.8\%$ ,夏季占 $50.6\%$ ,秋季占 $24.8\%$ ,冬季占 $0.2\%$ 。

扎尕那地区地势为南低北高,最高点为北部光盖山主脊的达尼杂果,海拔 $4\,458\text{ m}$ ,最低点为益哇沟谷底,海拔 $2\,445\text{ m}$ ,相对高差 $2\,013\text{ m}$ 。其地形特点是沟谷发育、切割强烈、地表起伏大、山势陡峻、相对高差大、坡度大等。扎尕那的水系属长江流域嘉陵江水系白龙江支流的益哇曲、当多曲。益哇曲和当多曲均发源于光盖山,其中,益哇曲集

水面积为 $219.6\text{ km}^2$ ,多年平均径流量 $0.625\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ ;当多曲集水面积为 $102\text{ km}^2$ ,多年平均径流量 $0.291\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ 。由于植被覆盖度高,林草茂密,水土流失轻微。境内山高坡陡,汛期暴雨期间,径流汇流迅速,造成河流流量猛增、水位暴涨,因而常常发生洪水。

研究区土壤的分布因受地理因素的影响,表现为垂直分布和区域分布的特点,总体属棕壤草甸土区。土壤以山地棕壤、亚高山草甸土为主,主要有褐土、暗棕壤、石质黄土次之<sup>[10]</sup>。土壤的垂直分带谱为新积土-山地褐色土-山地棕壤-暗棕壤-亚高山草甸土-高山草甸土-高山寒漠土。其中海拔 $2\,800\text{ m}$ 以下的土壤肥力较高,但土层厚度薄,保肥力弱;海拔 $2\,800\text{ m}$ 以上因土壤阴冷潮湿,微生物活动弱,有机质分解和养分释放能力差。在海拔 $3\,200\sim 4\,000\text{ m}$ 的林间空地和林限以上的部分地区是亚高山草甸土类,常和暗棕壤、棕壤相互交错。高山寒漠土零星分布在海拔 $4\,000\text{ m}$ 以上的地区,发育程度低,零星分散,植被稀少,几乎全为裸岩。土壤无土层分化,遍布岩石碎屑,当地藏民称为流石滩。

## 2 植被和土壤的垂直地带性分布

### 2.1 植被垂直地带性

山地具有浓缩的环境梯度、高度异质化的生境以及相对较低的人类干扰强度,是景观多样性和生物多样性的集聚地<sup>[1-2]</sup>。山地景观垂直变化梯度较大,大约是水平变异梯度的 $1\,000$ 倍,短短数千米的山地垂直距离甚至能涵盖从赤道到极地的各种植被类型,堪称水平地带性规律的“缩影模型”<sup>[11-12]</sup>。山地不同高度的变化导致水、热状况的垂直分异,是形成垂直地带性规律的原因所在<sup>[5]</sup>。迭部县植被带受地形地貌及水、热状况的影响,在分布上具有明显的垂直变化及阴阳坡差异<sup>[10]</sup>(表1)。

甘肃处于中国-喜马拉雅、中国-日本、亚洲荒漠和青藏高原植物亚区的交汇地带。根据植被区划,本区植被属甘南高原、山地植被区域,洮岷山地亚寒带针叶林植被区,白龙江中上游亚寒带针叶林植被小区。该区地处白龙江中上游青藏高原峡谷区,地形高差悬殊,气候垂直变化明显,因此导致植被分布的多样性。受地形地貌的影响,植被在分布上具有明显的垂直变化及阴阳坡差异。植被垂直分带的分布自上而下:海拔 $3\,800\sim 4\,200\text{ m}$ 为高山灌丛及高山草甸带;海拔 $2\,500\sim 3\,800\text{ m}$ 为亚高山

针叶林带；海拔 2 500 m 以下为针阔叶混交林带。主要树种有秦岭云杉、岷江冷杉、紫果云杉、垂枝云杉、糙皮云杉，此外还有华山松、油松、铁杉、落叶松等分布。阔叶树种有红桦、白桦、山杨、槭树、高山柳、辽东栎、椴等。

根据野外调查，典型的益哇沟山区垂直植被带谱的主要特征如下<sup>[10]</sup>：

(1) 高寒荒漠带。分布于海拔 4 150 m 以上，植物种类较少，其上多以耐寒中生植物、高山垫状植物为主，植被盖度在 10% 以下。主要分布有菊科、灯芯草科、石竹科、禾本科等对高寒环境适应性较强的先锋植物。

(2) 高寒草甸灌丛带。分布于海拔 4 150 ~ 4 050 m，这是一个特别的植被带，地貌为高山坡地，土壤为高山土，分布有稀疏灌木，草本植物种类则较为丰富，植被盖度在 50% 以上。

(3) 高寒草甸带。分布于海拔 4 050 ~ 3 800 m，主要在高山坡地和山峰周围，气候寒冷，热量不足，植物生长期短，多以耐寒中生、湿中生植物为主，植被盖度在 90% 以上。主要分布有菊科、莎草科、禾本科、石竹科、毛茛科、龙胆科、景天科等植被。

(4) 高山灌丛圆柏混交带。分布于海拔 3 800 ~ 3 600 m，植物种类比较丰富，主要以耐寒中生、旱中生的灌木为主，其中混生有稀疏的圆柏，且随海拔的降低圆柏分布增多，海拔 3 800 m 为其分布上限，林下伴生着丰富的草本，此植被带植被盖度 95% 以上。

(5) 针叶林带。圆柏林亚带分布于海拔 3 600 ~ 3 400 m，此植被带主要是柏科的圆柏，伴生有松科的岷江冷杉；冷杉林亚带分布于海拔 3 400 ~ 2 900 m，此植被带主要是松科的紫果云杉（铁杆松）、青扦、秦岭冷杉、巴山冷杉、岷江冷杉。

(6) 针阔混交林带。分布于海拔 2 900 ~ 2 450 m，主要是松科的油松、桦木科的红桦、白桦为主的针阔混交林，边缘分布有灌木，林下主要是草本植物，植被盖度在 95% 以上。

## 2.2 土壤垂直地带性

迭部县土壤的分布因受地形地貌、气候、植被等因素的影响，表现为垂直分布和区域分布的特点，总体属棕壤草甸土区。以山地棕壤、亚高山草甸土为主，主要有褐土、暗棕壤、石质黄土次之。土壤的垂直带谱为<sup>[10]</sup>：山地褐色土，分布在海拔 2 300 m 以下，以沉积黏化为主，黏化层明显，土体呈棕褐色，碳酸钙在土体中淋溶沉积活跃，形成假

菌系状、根管状、斑块状沉积。因长期耕种，耕作层土壤有复盐现象，碳酸钙含量高，土壤中性偏碱，有机质积累弱于暗棕壤和山地棕壤。表层有机质含量 1% ~ 11%，全氮 0.05% ~ 0.5%，全磷 0.017% ~ 0.128%，全钾 1.45% ~ 2.95%，速效磷为 2 ~ 25 mg · kg<sup>-1</sup>，速效钾 105 ~ 1 058 mg · kg<sup>-1</sup>，林地腐殖质积累多，有机质含量高于农地。山地棕壤土，分布在海拔 2 300 ~ 2 600 m 的半山地区，呈带状，成土母质以页岩、千枚岩等泥质岩类风残坡积物和黄土为主，碳酸盐岩类与酸性岩类风化的残积坡积物次之。生成于暗棕壤以下湿润的山地森林地带和林间草地，土壤的淋溶、黏化和有机质积累的腐化过程明显，易溶盐和碳酸钙被淋洗，pH 值为 6 ~ 7.0。表层有 0 ~ 7 cm 厚的枯枝落叶层，其下有厚约 20 ~ 30 cm 的腐殖质层，内有机质含量为 2% ~ 23%，全氮 0.2% ~ 1.2%。暗棕壤，分布在海拔 2 600 ~ 3 500 m，成土母质多为碳酸盐岩、泥质岩、红沙砾岩风化坡积物与黄土，由于降水量多，生成温度低，腐殖化作用强烈，腐殖质层有机质含量一般为 10% ~ 45%，全氮 0.5% ~ 1.6%；亚高山草甸土，3 500 ~ 3 800 m；高寒草甸土，分布在海拔 3 800 ~ 4 000 m；高寒荒漠土，零星分布在海拔 4 000 m 以上的地区，发育程度低，零星分散，植被稀少，几乎全为裸岩。土壤无土层分化，遍布岩石碎屑，当地藏民称为流石滩（表 1）。

扎尔那地区土壤具有明显的山地特征，随海拔升高呈现出规律性垂直分布，水平方向呈差异性分布（图 1）。总体土壤较薄，但有机质含量高，肥力较强，良好的土壤条件是多种林木繁衍生长的基础，也为野生动植物的繁衍生息提供了良好的生态环境。

## 3 研究方法

### 3.1 土壤成分数据获取及处理

在扎尔那研究区域内，采用布设样点调查的方法<sup>[13]</sup>，在垂直河流方向布设平行样带 23 条（表 2）。样带垂直相隔 100 m，在样带上根据不同土壤和植被类型，选择典型样点开挖剖面。用环刀（100 g · cm<sup>-3</sup>）在同一层不同位置取 3 次用来测土壤容重；然后在相同深度再取 1 000 kg 左右土样装入土样袋带回实验室，用来分析土壤的理化属性和其他内容的研究。土壤成分由中国科学院寒区旱区环境与工程研究所水土资源研究室分析，并提供分析资料。

土壤化学成分项目包括土壤有机质、全氮、全

表 1 扎尕那地区垂直自然地带性

Table 1 Vertical natural zonality in Zhagana area of Diebu, Gansu Province

| 分布海拔/m    | 气候垂直分带    | 植被垂直分带  |           | 土壤垂直分带 |
|-----------|-----------|---------|-----------|--------|
|           |           | 阴坡      | 阳坡        |        |
| 4000 以上   | 高山荒漠带     | 高寒荒漠带   | 高寒荒漠带     | 高寒荒漠带  |
| 3600~4000 | 高山灌丛草甸带   | 高寒草甸灌丛带 | 高寒草甸灌丛带   | 高寒草甸带  |
|           |           | 高山灌丛带   | 高山灌丛圆柏混交带 | 亚高山草甸带 |
| 2900~3600 | 山地针叶林带    | 冷杉林亚带   | 圆柏林亚带     | 暗棕壤    |
|           |           | 云杉林亚带   | 冷山林亚带     | 山地棕壤   |
| 2450~2900 | 山地针阔叶混交林带 | 针阔混交林带  | 针阔混交林亚带   | 山地褐色土  |

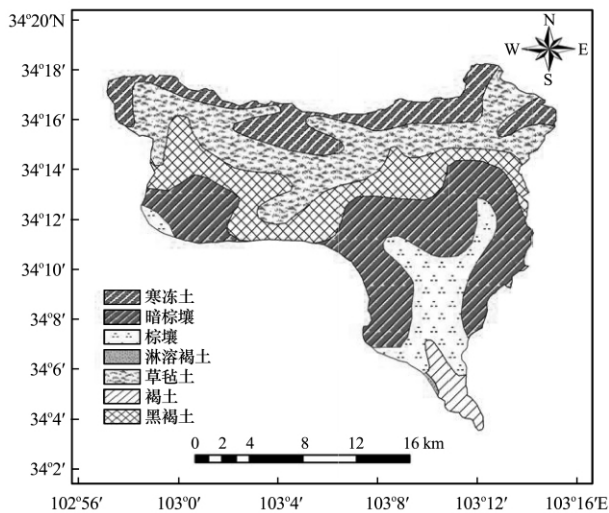


图 1 扎尕那地区土壤类型分布

Fig. 1 Soil pattern distribution of Zhagana area, Diebu, Gansu Province

磷、速效氮等成分含量的分析。其中，有机物质含量用重铬酸钾容量法测得；全氮含量用半微量开氏法测定；全磷含量用  $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$  法；速效氮用碱解扩散法（这些分析测量都是在由通过国家认证的中国科学院寒区旱区环境与工程研究所水土资源研究室专业实验室由专业人员分析）。土壤物理性质分析选择土壤粒度、土壤容重和土壤饱和导水率 3 个指标，土壤粒度分析是用 Malvern Mastersizer2000 激光粒度分析仪（英国 Malvern 公司产）分析测得，该仪器的测量范围为  $0.02\sim2\,000\,\mu\text{m}$ ，重复测量误差小于 2%；土壤容重用环刀法测得，采用  $100\,\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  的环刀在开挖剖面上按土层分布，分别从同一深度取 3 个重复，然后在实验室用烘干箱在  $105\,^{\circ}\text{C}$  下烘干 8 h，用电子称重计算所得。

3.2 其他地理信息数据获取与土壤信息叠加

应用 GIS 软件数字化研究区地形图，提取坡度、坡向等地形因子，裁剪中国土地利用类型图，

得到研究区土地利用类型图。将采样点数据叠加在坡度、坡向和土地利用类型图上，提取其属性数据进行统计分析<sup>[14-17]</sup>。最后依据分析结果，分别讨论影响土壤过程垂直分带性的因素。

4 结果分析

4.1 土地利用类型垂直带特征

基于 GIS 软件，结合甘肃省迭部县土地利用调查资料，对我国土地利用类型图进行裁剪，得到研究区土地利用类型图（图 2）。

从图 2 可以看出，海拔  $2\,500\sim4\,000\,\text{m}$  地带植被类型丰富，海拔  $2\,500\,\text{m}$  以下仅有高覆盖度草地、低覆盖度草地和耕地，且所占比例较小；海拔  $4\,000\,\text{m}$  以上主要为高覆盖度草地、低覆盖度草地、高寒荒漠/苔原以及有林地，其中海拔  $4\,500\,\text{m}$  以上所占比例极小。研究区中高覆盖度草地贯穿整个海拔梯度，除海拔  $4\,500\,\text{m}$  以上，低覆盖度草地也几乎分布整个区域；高寒荒漠/苔原分布在海拔  $4\,000\,\text{m}$  以上；针阔混交林以及阔叶林分布在海拔  $3\,500\,\text{m}$  以下；针叶混交林以及针叶林分布在海拔  $3\,000\sim4\,000\,\text{m}$  的范围；耕地因受海拔高度的影响，分布在海拔  $3\,000\,\text{m}$  以下。其中，海拔  $4\,500\sim5\,000\,\text{m}$  的范围内主要以高覆盖度草地为主占 64%，其次为高寒荒漠/苔原占到 29%，并且它们的面积极小；海拔  $4\,000\sim4\,500\,\text{m}$  的范围内高寒荒漠/苔原占到 50%，其次为低覆盖度草地为 44%；海拔  $3\,500\sim4\,000\,\text{m}$  的范围内以高覆盖度草地为主，占 51%，其次为冷杉，占 14%；海拔  $3\,000\sim3\,500\,\text{m}$  的范围内以高覆盖度草地为主，占 34%，其次为冷杉 23%；海拔  $2\,500\sim3\,000\,\text{m}$  的范围内植被最为丰富，高覆盖度草地占 29%，有林地占 21%，针阔混交林占 10%；海拔  $2\,500\,\text{m}$  以下植被面积较小，其中，平原耕地所占面积比例最大为

表 2 土壤采样点信息与土壤成分分析结果

Table 2 The results of chemical analysis of soil samples

| 样品<br>编号 | 海拔<br>/m | 坡向      | 土地利用<br>类型 | 有机质<br>$/(g \cdot kg^{-1})$ | 全氮<br>$/(g \cdot kg^{-1})$ | 全磷<br>$/(g \cdot kg^{-1})$ | 速效磷<br>$/(g \cdot kg^{-1})$ | 容重<br>$/(g \cdot cm^{-3})$ | pH 值 |
|----------|----------|---------|------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|------|
| 1        | 4031     | 南       | 高覆盖度草地     | 89.77                       | 4.78                       | 2.47                       | 9.05                        | 1.33                       | 7.53 |
| 2        | 3786     | 西南      | 高覆盖度草地     | 78.68                       | 4.26                       | 2.15                       | 7.45                        | 0.94                       | 7.21 |
| 3        | 3594     | 西       | 高覆盖度草地     | 65.52                       | 3.55                       | 2.56                       | 9.05                        | 0.68                       | 6.26 |
| 4        | 3405     | 东南      | 高覆盖度草地     | 38.00                       | 2.23                       | 2.25                       | 2.75                        | 1.44                       | 6.26 |
| 5        | 3201     | 南       | 山地旱地       | 82.42                       | 4.44                       | 1.74                       | 7.68                        | 0.80                       | 6.36 |
| 6        | 2960     | 东       | 山地旱地       | 21.00                       | 1.42                       | 1.50                       | 4.93                        | 1.27                       | 8.11 |
| 7        | 2911     | 西       | 平原旱地       | 49.53                       | 2.86                       | 1.56                       | 8.59                        | 1.38                       | 8.54 |
| 8        | 3571     | 西北      | 有林地        | 181.16                      | 5.93                       | 1.94                       | 12.14                       | 1.038                      | 5.98 |
| 9        | 4070     | 西南(背风坡) | 高寒草甸       | 70.27                       | 4.13                       | 2.36                       | 16.73                       | 0.8908                     | 5.02 |
| 10       | 4047     | 西南(迎风坡) | 高寒草甸       | 117.25                      | 5.77                       | 2.27                       | 12.26                       | 0.5721                     | 7.09 |
| 11       | 3427     | 南       | 高覆盖度草地     | 52.10                       | 3.09                       | 2.36                       | 3.67                        | 1.0242                     | 5.72 |
| 12       | 3228     | 东       | 高覆盖度草地     | 25.34                       | 1.76                       | 1.69                       | 1.72                        | 1.3318                     | 7.94 |
| 13       | 3031     | 东       | 山地旱地       | 11.18                       | 0.87                       | 1.49                       | 3.09                        | 1.1843                     | 8.44 |
| 14       | 2922     | 南       | 山地旱地       | 14.82                       | 1.12                       | 1.32                       | 2.18                        | 1.0834                     | 8.36 |
| 15       | 2803     | 南       | 高覆盖度草地     | 28.05                       | 1.78                       | 2.03                       | 1.95                        | 1.1992                     | 8.22 |
| 16       | 2645     | 平面      | 高覆盖度草地     | 28.61                       | 1.95                       | 1.48                       | 5.38                        | 1.3057                     | 8.43 |
| 17       | 2632     | 南       | 高覆盖度草地     | 18.45                       | 1.41                       | 1.7                        | 2.75                        | 1.1113                     | 8.32 |
| 18       | 2655     | 东       | 高覆盖度草地     | 28.21                       | 1.95                       | 1.98                       | 3.67                        | 0.9435                     | 8.16 |
| 19       | 2538     | 东南      | 农村居民点      | 50.08                       | 2.91                       | 2.50                       | 13.06                       | 0.9749                     | 8.25 |
| 20       | 2540     | 东南      | 农村居民点      | 43.34                       | 2.60                       | 2.91                       | 42.96                       | 1.1043                     | 8.12 |
| 21       | 2419     | 东北      | 平原旱地       | 43.54                       | 2.70                       | 2.87                       | 9.05                        | 1.043                      | 8.3  |
| 22       | 2426     | 南       | 平原旱地       | 40.18                       | 2.42                       | 7.18                       | 59.12                       | 1.0561                     | 8.63 |
| 23       | 2408     | 西南      | 平原旱地       | 27.78                       | 1.70                       | 6.28                       | 49.26                       | 0.9791                     | 8.73 |

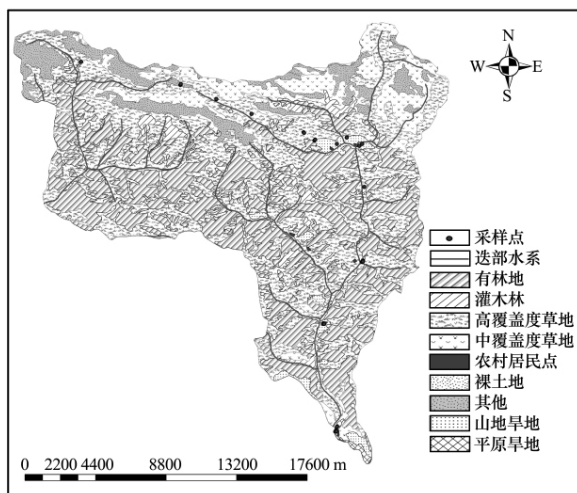


图 2 研究区土地利用类型

Fig. 2 Land use type map of Zhagana area,  
Diebu, Gansu Province

63%，其次为低覆盖度草地占 24%和高覆盖度草地占 13%(表 3)。

## 4.2 土壤成分分析

### 4.2.1 土壤化学成分分析

气候、植被因素从宏观方向影响土壤有机质的

含量，气候因素从水、热方面决定植被类型<sup>[17-18]</sup>。一般在 0℃以下土壤有机质的分解速率很小，年平均温度下降 1℃，土壤有机质含量增加 2~3 倍<sup>[19-24]</sup>。土壤水分也影响有机物分解速率，水分过多，有机质分解较为缓慢，但除常年渍水的湿地土壤外，一般情况下没有温度的影响大<sup>[25-27]</sup>。山区表现的尤为突出，随海拔升高，温度降低，植被发生变化，土壤有机质含量随海拔升高而增多，但达到一定高度时反而降低。

扎尕那土壤有机质总体分布随海拔升高而升高，但每一剖面的有机质含量却是地表含量高，向下逐步降低。在海拔 3 400 m 界限之上，表层有机质随海拔升高而升高；海拔 3 400 m 之下，表层有机质随海拔降低反而增加(图 3)。结合图 2 可以看出，研究区土壤对应不同植被分带类型在相应植被分属下表现为：有林地有机质含量最大为 181.16  $g \cdot kg^{-1}$ ，总体含量大小依次为：有林地>高寒草甸>高覆盖度草地>农村居民点>平原耕地>山地耕地。

土壤全氮量与有机质含量呈极好的线性正相关

表 3 不同海拔带植被分布特征

Table 2 Vegetation area ratio based on elevation gradient

| 海拔/m      | 4500~5000 | 4000~4500 | 3500~4000 | 3000~3500 | 2500~3000 | 2000~2500 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 高寒荒漠/苔原/% | 29        | 50        | 5         |           |           |           |
| 高覆盖度草地/%  | 64        | 6         | 51        | 34        | 29        | 13        |
| 低覆盖度草地/%  |           | 44        | 13        |           | 5         | 24        |
| 有林地/%     | 7         |           | 10        | 18        | 21        |           |
| 冷杉/%      |           |           | 14        | 23        | 8         |           |
| 云杉/%      |           |           | 2         | 9         | 6         |           |
| 油松/%      |           |           | 1         | 2         | 1         |           |
| 灌木林/%     |           |           | 4         | 1         | 2         |           |
| 针叶混交/%    |           |           |           | 6         | 5         |           |
| 针阔混交/%    |           |           |           | 5         | 10        |           |
| 红桦/%      |           |           |           | 2         | 3         |           |
| 白桦/%      |           |           |           |           | 1         |           |
| 山地耕地/%    |           |           |           |           | 9         |           |
| 平原耕地/%    |           |           |           |           |           | 63        |

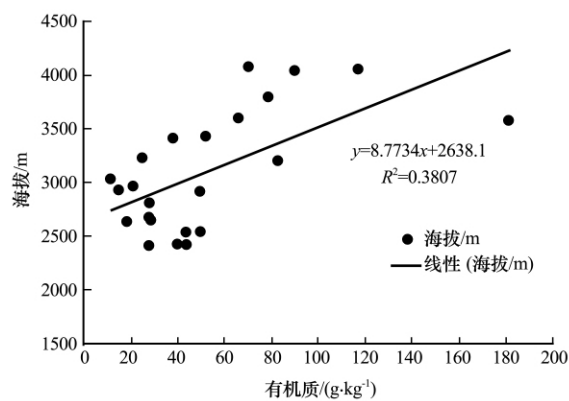


图 3 土壤有机质与海拔的关系

Fig. 3 Relationship of soil organic matters with elevation

( $r=0.940$ ,  $n=685$ ). 因此, 扎尕那土壤全氮的空间分布与有机质分布的趋势一致, 土壤全氮含量决定于有机质含量.

扎尕那土壤全磷水平普遍较高, 主要与母质含磷量有关, 但一般土壤表层的全磷高于母质层, 说明土壤磷普遍存在表聚现象. 将酸性土和碱性土分开看, 森林型土壤含磷量总是大于高山土壤; 相应土类的含磷量, 酸性土大于碱性土. 总体上, 土壤速效磷在酸性土中随 pH 值的升高而升高, 在碱性土中随 pH 值得升高而降低.

土壤酸碱度对土壤养分的有效性有重要影响. 在  $\text{pH}=6\sim7$  的微酸条件下, 土壤养分的有效性最好, 有利于植物生长. 在酸性土壤中容易引起钾、钙、镁、磷等元素的短缺, 而在强碱性土壤中容易引起铁、硼、铜、锰和锌的短缺, 土壤酸碱度还通过影响微生物的活动而影响植物的生长<sup>[15]</sup>. 扎尕那地区 pH 值在  $5.02\sim8.73$  之间, 大多数取样点

的 pH 在  $6\sim7$  之间, 表明扎尕那地区土壤养分的有效性很好, 有利于植物生长.

4.2.2 土壤机械组成分析

土壤容重可作为土壤熟化程度指标之一, 熟化程度较高的土壤, 容重常较小. 土壤容重的大小可以反映土壤结构、透气性、透水性能以及保水能力的高低, 土壤容重越小说明土壤结构、透气透水性能越好. 土壤容重的大小与土壤质地、结构、有机质含量、土壤紧实度、耕作措施等有关. 砂土容重较大, 黏土容重较小; 一般腐殖质多的表层容重较小<sup>[20]</sup>. 扎尕那风景区土壤容重在  $0.57\sim1.44\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  之间, 表明该地区有机质含量较多, 土壤比较疏松, 孔隙多, 透气透水性能好, 土壤结构很好.

根据扎尕那土壤粒级分布表, 黏粒组分在  $48\%\sim77\%$  之间, 沙粒、粉粒组分含量适中. 结合容重较小, 可以判定扎尕那土壤质地属于黏质壤土, 兼有砂土类和黏土类土壤肥力的特点. 这种土壤既有砂质土的良好通透性和耕性, 发小苗等优点, 又有黏土对水分、养分的保蓄性, 肥效稳而长等优点, 是药用植物栽培理想的土壤, 适应种植多种植物, 根及根状茎入药的植物更宜栽培.

4.3 地形因子分析

数字化研究区地形图, 以等高线为基底创建 TIN 表面, 在 GIS 软件 3D 分析模块下分别分析坡度和坡向因子, 叠加分析采样点土壤成分, 提取坡度、坡向属性数据对样点土壤属性的影响因子(图省略). 根据分析结果, 研究区坡度普遍较高, 这主要与当地特殊的地质构造有关. 坡度普遍较大, 所以剔除坡度因子.

山地因地理位置不同, 可分为阳坡/阴坡或迎

风坡/背风坡。早在 1964 年, Klemmedson 等<sup>[28]</sup>就对美国 Idaho 州南中部干旱地区 Snake 河南边的小山作过土壤坡向性研究发现, 南北两坡土壤含水量、质地以及有机质有明显分异, 认为土壤坡向性分异的原因是地形因素影响植物生产力和凋落物归还量及其分解, 使土壤有机质有违地带性分布规律的局域含量过高或过低。一般来说阴坡和迎风坡土壤有机质积累的多。我们在研究区选取 4 个水平海拔梯度为基底, 分别研究不同坡向对土壤有机碳含量的影响(图 4)。结果表明: 在海拔 2 420 m 左右的高度上, 有机质含量为半阴坡 > 半阳坡; 海拔 2 640 m 左右, 有机质含量为半阴坡 > 阳坡; 海拔 3 580 m 左右, 有机质含量为阴坡 > 半阳坡; 海拔 4 050 m 左右, 有机质含量为半阳坡 > 阳坡。比较分析后得到, 不同坡向土壤有机质含量大小依次为阴坡 > 半阴坡 > 半阳坡 > 阳坡。同时发现, 在迎风坡方向有机碳含量大于背风坡方向, 如采样点 10 号 > 样点 9 号。

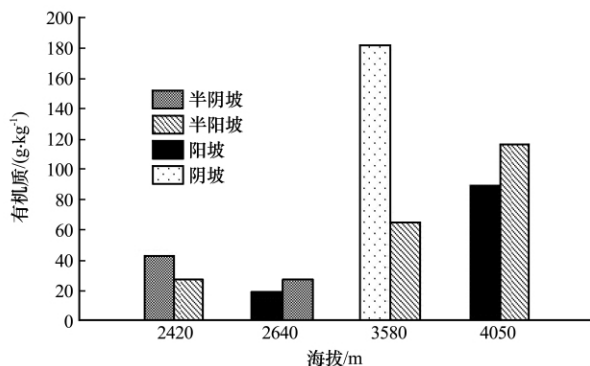


图 4 不同海拔带上坡向对土壤有机质含量的影响

Fig. 4 Organic matter on different slopes with elevation

#### 4.4 综合分析

统计土壤化学成分的分析结果可以看出, 土壤有机质含量与全氮含量呈现极显著正相关(图 5), 全氮含量取决于有机质含量, 因此, 全氮量与有机质的空间分布趋势一致。同样, 统计结果表明: 有机碳含量与 pH 值呈现显著负相关, 在 pH 值为 6 ~ 8 之间有机碳含量较高。说明在这个范围内的 pH 值, 最适宜有机碳的积累, 而在这个范围内也是植物最适生长的范围。

土壤有机碳含量总体上与海拔呈正相关变化, 但在同海拔区域的不同植被、不同坡向及水文条件下又表现不同。如样点 3 和样点 8 都在海拔 3 580 m 的区域内, 但因不同植被及其坡向的影响, 使得样点 8(海拔 3 571 m、有林地、阴坡)远远大于

样点 3(海拔 3 594 m、草地、半阳坡)。在同海拔范围和同植被条件下, 因坡向因子的影响, 有机碳含量又表现出不同, 如样点 17 和样点 18。在其他条件都基本相同的情况下, 又因水文因子的影响而出现不同, 如样点 4 和样点 11。

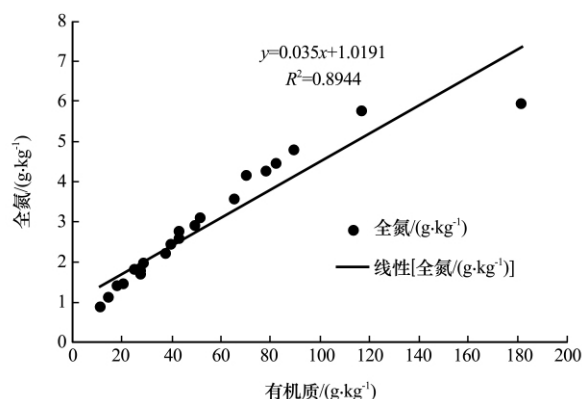


图 5 土壤全氮含量与有机质含量的关系

Fig. 5 The relationship between soil total nitrogen and organic matter content

结合扎尔那气象数据<sup>[10]</sup>, 气温随高度递减, 降水量随高度递增, 而这些都会减缓土壤成分中有机质的分解速率。由于林地中大量有机躯体的腐烂, 加快了有机碳的积累。特殊的地理位置, 使得扎尔那土壤有机碳含量普遍较高。

#### 5 结论

扎尔那地理位置特殊, 拥有中国内陆少有的古冰川岩溶地貌, 区内海拔跨度较大, 土壤过程总体随海拔正向变化。但同时又受到气候、水文、植被和地形等因子的影响, 土壤成土过程发生不同程度的变化。

通过对不同影响因子的分析得出, 在各个影响因子的影响下土壤过程呈现不同变化, 如在不同植被类型下, 土壤有机碳含量大小表现为有林地 > 高寒草甸 > 高覆盖度草地 > 农村居民点 > 平原耕地 > 山地耕地; 在地形因子影响下, 土壤有机碳含量随不同坡向而不同, 表现为阴坡 > 半阴坡 > 半阳坡 > 阳坡; 在水文因子影响下, 土壤有机碳含量随降水量的大小而不同, 温度较低、降水量较大区域, 有机碳含量较高, 而靠近河流区域的有机碳含量又较小。

总之, 扎尔那地区的土壤过程主要是在海拔梯度的影响下, 同时受到多种影响因子的干扰, 而呈现规律性垂直分带性的变化。

## 参考文献 (References):

- [1] Lauer W. Human development and environment in the Andes: A geoecological overview [J]. Mountain Research and Development, 1993, **13**: 157—166.
- [2] Körner C. The use of altitude in ecological research [J]. Trends in Ecology and Evolution, 2007, **22**: 569—574.
- [3] Sun Ranhao, Chen Liding, Zhang Baiping, *et al.* Vertical zonation of mountain landscape: A review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, **20**(7): 1617—1624. [孙然好, 陈利顶, 张百平, 等. 山地景观垂直分异研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(7): 1617—1624.]
- [4] Su Wencai. Geographic regularity of soil distributional vertical zonation [J]. Journal of Henan Normal University, 1980 (2): 117—128. [苏文才. 论土壤分布的垂直地带性地理规律[J]. 河南师大学报, 1980(2): 117—128.]
- [5] Guo Ran, Wang Xiaoke, Lu Fei, *et al.* Soil carbon sequestration and its potential by grassland ecosystems in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(2): 862—867. [郭然, 王效科, 逯非, 等. 中国草地土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, **28**(2): 862—867.]
- [6] Bao Xinkui, Cao Guangmin, Gao Yixin. Formation environment and genetic mechanism of mattic epipedon [J]. Acta Pedologica Sinica, 1995, **32**(Suppl.): 45—52. [鲍新奎, 曹广民, 高以信. 草毡表层的形成环境和发生机理[J]. 土壤学报, **32**(增刊): 45—52.]
- [7] Li Yingnian, Wang Qinxue, Du Mingyuan, *et al.* A study on replenishment and decomposition of organic matter in and mat-cryic cambisols CO<sub>2</sub> flux between vegetation and atmosphere [J]. Acta Agrestia Sinica, 2006, **14**(2): 165—169. [李英年, 王勤学, 杜明远, 等. 寒冻雏形土有机质补给、分解及大气 CO<sub>2</sub> 通量交换[J]. 草地学报, 2006, **14**(2): 165—169.]
- [8] Zhang Wenlong, Li Yuhuan, Ji Xiang. Spatial variability and comparison of different models of interpolation of tillage-layer soil organic matter based on geostatistics [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, **27**(6): 256—260. [张文龙, 李玉环, 姬祥. 基于地统计学的耕层土壤有机质空间变异及不同插值模型比较[J]. 中国农学通报, 2011, **27**(6): 256—260.]
- [9] Chuai Xiaowei, Huang Xianjin, Lai Li, *et al.* Accounting of surface soil carbon storage and response to land use change based on GIS [J]. Transactions of the CSAE, 2011, **27**(9): 1—6. [揣小伟, 黄贤金, 赖力, 等. 基于 GIS 的土壤有机碳储量核算及其对土地利用变化的响应[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(9): 1—6.]
- [10] Shen Yongping. Research Report on Quaternary Glacial Landforms Investigation and Their Development and Protection Planning in Zhagana Region of Diebu (Tiewo) County, Gansu Province [R]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2010: 1—210. [沈永平. 甘肃省迭部县扎尕那景区冰川地貌考察及开发保护规划研究报告[R]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2010: 1—210.]
- [11] Körner C. Why are there global gradients in species richness? Mountains might hold the answer [J]. Trends in Ecology and Evolution, 2000, **15**: 513—514.
- [12] Allan NJR. Accessibility and altitudinal zonation models of mountains [J]. Mountain Research and Development, 1986, **6**: 185—194.
- [13] Chen Tianen, Chen Liping, Wang Yanji, *et al.* Optimal arrangement of soil nutrient sampling based on geo-statistics [J]. Transactions of the CSAE, 2009, **25**(2): 49—55. [陈天恩, 陈立平, 王彦集, 等. 基于地统计的土壤养分采样布局优化[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(2): 49—55.]
- [14] Li Xinyu, Yu Wantai, Li Xiuzhen. Comparison and application of remote sensing and geostatistics methods to spatial distribution of surface soil organic carbon [J]. Transactions of the CSAE, 2009, **25**(3): 148—152. [李欣宇, 宇万太, 李秀珍. 遥感与地统计方法在表层土壤有机碳空间格局研究中的应用比较[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(3): 148—152.]
- [15] Cai Fu, Ming Huiqing, Liu Bing, *et al.* Analysis of precipitation for different periods in Northeast China based on geostatistics and GIS [J]. Chinese Journal of Agro-meteorology, 2006, **27**(4): 296—299. [蔡福, 明惠青, 刘兵, 等. 采用地统计学和 GIS 技术对东北地区不同时期降水的分析[J]. 中国农业气象, 2006, **27**(4): 296—299.]
- [16] Zhao Ruifeng, Chen Yaning, Hong Chuanxun, *et al.* Study on spatial variability and pattern of soil salinity of the oasis in the headstreams of the Tarim River Basin: A case study on Yuepuhu oasis [J]. Geographical Research, 2008, **27**(1): 135—144. [赵锐锋, 陈亚宁, 洪传勋, 等. 塔里木河源流区绿洲土壤含盐量空间变异和格局分析——以岳普湖绿洲为例[J]. 地理研究, 2008, **27**(1): 135—144.]
- [17] Chuai Xiaowei, Huang Xianjin, Lai Li, *et al.* Accounting of surface soil carbon storage and response to land use change based on GIS [J]. Transactions of the CSAE, 2011, **27**(9): 1—6. [揣小伟, 黄贤金, 赖力, 等. 基于 GIS 的土壤有机碳储量核算及其对土地利用变化的响应[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(9): 1—6.]
- [18] Wang Xuejia, Yang Meixue, Wan Guoning. Processes of soil thawing-freezing and features of ground temperature and moisture at D105 on the Northern Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, **34**(1): 56—63. [王学佳, 杨梅学, 万国宁. 藏北高原 D105 点土壤冻融状况与温湿特征分析[J]. 冰川冻土, 2012, **34**(1): 56—63.]
- [19] Zhao Changming, Gao Xianliang, Ma Renyi, *et al.* Responses of *Sabina przewalskii* and *Picea crassifolia* seedlings to different draught stress of soil in ecophysiological characteristics [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, **34**(1): 147—154. [赵长明, 高贤良, 马仁义, 等. 祁连圆柏和青海云杉幼苗生理生态特征对土壤干旱胁迫的响应[J]. 冰川冻土, 2012, **34**(1): 147—154.]
- [20] Wang Yibo, Wang Genxu, Wu Qingbo, *et al.* The impact of vegetation degeneration on hydrology features of alpine soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, **32**(5): 989—998. [王一博, 王根绪, 吴青柏, 等. 植被退化对高寒土壤水文特征的影响[J]. 冰川冻土, 2010, **32**(5): 989—998.]
- [21] Wang Jiaoyue, Song Changchun, Wang Xianwei, *et al.* Progress in the study of effect of freeze-thaw processes on the organic carbon pool and microorganisms in soils [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **33**(2): 442—452. [王娇月, 宋长春, 王宪伟, 等. 冻融作用对土壤有机碳库及微生物的影响研究进展[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(2): 442—

- 452.]
- [22] Wang Zengru, Yang Guojing, He Xiaobo, *et al.* Relationship between plant community and environmental factors in the source region of Yangtze River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33** (3): 640—645. [王增如, 杨国靖, 何晓波, 等. 生长江源区植物群落特征与环境因子的关系 [J]. *冰川冻土*, 2011, **33** (3): 640—645.]
- [23] Li Lin, Wang Zhenning, Xu Weixin, *et al.* Response of growth of typical plateau meadow on Tibetan Plateau to climate change [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(5): 1006—1013. [李林, 王振宇, 徐维新, 等. 青藏高原典型高寒草甸植被生长发育对气候和冻土环境变化的响应 [J]. *冰川冻土*, 2011, **33** (5): 1006—1013.]
- [24] Hu Ping, Wu Xiukun, Li Shiweng, *et al.* Progress of studies on permafrost microbial ecology in the past 10 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(3): 732—739. [胡平, 伍修锐, 李师翁, 等. 近 10 a 来冻土微生物生态学进展 [J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(3): 732—739.]
- [25] Zhang Shimin, Li Shuangyang. Experimental study of the Tibetan silty clay under freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34** (3): 625—631. [张世民, 李双洋. 青藏粉质黏土冻融循环试验研究 [J]. *冰川冻土*, 2012, **34** (3): 625—631.]
- [26] Li Changming, Zhang Xinfan, Zhao Lin, *et al.* Phylogenetic diversity of bacteria isolates and community function in permafrost-affected soil along different vegetation types in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34** (3): 713—725. [李昌明, 张新芳, 赵林, 等. 青藏高原多年冻土区土壤需氧可培养细菌多样性及群落功能研究 [J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(3): 713—725.]
- [27] Wu Yaqiong, Liu Guohua, Fu Bojie, *et al.* Study on the vertical distribution of soil organic carbon density in the Tibetan Plateau [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(2): 362—367. [吴雅琼, 刘国华, 傅伯杰, 等. 青藏高原土壤有机碳密度垂直分布研究 [J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(2): 362—367.]
- [28] Klemmedson J O, Smith J G. Cheatgrass (*Bromus tectorum* L) [J]. *Botanical Review*, 1964, **30**: 226—262.

## Vertical Zonation of Alpine Soil Processes in Zhagana Area of Diebu, Gansu Province

TANG Cui-wen<sup>1, 2</sup>, SU Yan-ke<sup>1, 2</sup>, WANG Guo-ya<sup>3</sup>, SHEN Yong-ping<sup>4</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070, China ;

2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering

Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China ; 3. Geological

Hazards Prevention Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China ;

4. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese

Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)

**Abstract:** In order to study the process of soil with vertical zonation in the Zhagana in Diebu mountain area, Gansu Province, the vertical sampling for the different altitude and horizontal sampling for different vegetation and geographical were taken. On the basis of GIS, topographic and forest form map of study area were digitized, and the terrain factor such as altitude, slope aspect and gradient were extracted, and the land use map of study area was get by clipping the Chinese land use type map. Then the influence factors of the process of soil with vertical zonation were analyzed and discussed by superimposing the sampling point on the different terrain and land use map. The results show

that: the content of organic carbon and total nitrogen showed excellent linear positive correlation ( $r=0.95$ ), and increased with the elevating of altitude. In addition, in the same altitude range, the content of organic carbon changes regularly based on the change of land use type and slope aspects. The soil organic carbon content in different land use types were in the order of: forest land > alpine meadow > High grass coverage > rural dweller dot > plain farmland > mountain farmland. The soil organic carbon content in different aspects was in the order of: shady slope > half shady slope > half sunny slope > sunny slope.

**Key words:** soil; vegetation; terrain factor; vertical zonation of soil processes; Zhagana