

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2019120102

王晓龙,崔东,杨海军,等.苦豆子入侵对伊犁河谷草原不同海拔土壤养分和活性有机碳组分的影响[J].环境化学,2021,40(4):1232-1242.

WANG Xiaolong, CUI Dong, YANG Haijun, et al. Effects of *Sophora alopecuroides* invasion on soil nutrients and active organic carbon components at different altitudes in Yili valley steppe[J].Environmental Chemistry,2021,40(4):1232-1242.

苦豆子入侵对伊犁河谷草原不同海拔土壤养分和活性有机碳组分的影响*

王晓龙^{1,2} 崔东^{1,2,3**} 杨海军^{1,2} 闫俊杰^{1,2} 曹文秋^{1,2} 刘海军^{1,2}
 张静^{1,2} 沙吾丽^{1,2}

(1. 伊犁师范大学生物与地理科学学院, 伊宁, 835000; 2. 伊犁师范大学资源与生态研究所, 伊宁, 835000;
 3. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐, 830011)

摘要 苦豆子是伊犁河谷典型的毒害草之一.为了阐明苦豆子入侵对草地土壤生态环境的影响,以伊犁河谷山地草原不同海拔高度(海拔 1220 m、1440 m、1660 m)中苦豆子入侵程度不同的根际土壤为研究对象,采用野外样地调查及室内实验分析的方法,研究不同海拔苦豆子入侵对伊犁河谷山地草原土壤养分及活性有机碳组分的影响.研究表明,随着海拔梯度的升高,土壤硝态氮含量增加,3 个海拔高度下,裸地中土壤铵态氮含量随海拔升高而增大.在苦豆子轻度入侵中,铵态氮含量的大小顺序为海拔 1660 m>1220 m>1440 m.在苦豆子中度入侵中,铵态氮含量的大小顺序为海拔 1440 m>1220 m>1660 m.在苦豆子重度入侵中,铵态氮含量的大小顺序为海拔 1660 m>1220 m>1440 m,苦豆子的入侵对铵态氮影响很大.不同海拔裸地土壤速效磷含量为 1660 m>1220 m>1440 m;苦豆子轻度入侵土壤速效磷随着海拔梯度的升高呈现上升趋势,为 1660 m>1440 m>1220 m;而不同海拔苦豆子中度入侵土壤速效磷呈现下降趋势,为 1220 m>1440 m>1660 m.土壤速效氮随着海拔梯度的升高呈现递减趋势,为 1660 m>1440 m>1220 m.土壤速效钾随着海拔的升高呈现上升趋势,为 1220 m>1440 m>1660 m.在 3 个海拔下,0—10 cm 土层苦豆子轻度入侵、中度入侵、重度入侵土壤含水量分别比裸地增加了 1%、7%、16%、11%、14%、17%、4%、2%、11%;在 10—20 cm 土层土壤含水量增加了 4%、4%、13%、10%、7%、12%、32%、40%、48%.随着海拔升高土壤有机碳组分中易氧化有机碳和可溶性有机碳含量均出现明显升高的趋势.

关键词 伊犁河谷, 植物入侵, 苦豆子, 海拔, 土壤养分, 活性有机碳.

Effects of *Sophora alopecuroides* invasion on soil nutrients and active organic carbon components at different altitudes in Yili valley steppe

WANG Xiaolong^{1,2} CUI Dong^{1,2,3**} YANG Haijun^{1,2} YAN Junjie^{1,2}
 CAO Wenqiu^{1,2} LIU Haijun^{1,2} ZHANG Jing^{1,2} SHA Wuli^{1,2}

(1. College of Biology and Geography Science, Yili Normal University, Yining, 835000, China; 2. Institute of Resources and Ecology, Yili Normal University, Yining, 835000, China; 3. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, 830011, China)

Abstract: *Sophora alopecuroides* is one of the typical poisonous grasses in the Yili Valley. In order to clarify the impact of the invasion of *Sophora alopecuroides* on the grassland soil ecology in this area, rhizosphere soils of the *Sophora alopecuroides* of different intrusion degrees at different altitude

2019 年 12 月 1 日收稿(Received: December 1, 2019).

* 新疆维吾尔自治区高校科研计划项目(XJEDU2018Y042)资助.

Supported by the University Scientific Research Plan Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region (XJEDU2018Y042).

** 通讯联系人 Corresponding author, Tel: 15199226970, E-mail: cuidongw@126.com

gradients in the mountain grassland (1220 m, 1440 m, 1660 m above sea level) were chosen as the study object. The soil nutrients and active organic carbon components were analyzed using sample-plot survey and laboratory analysis. The results showed that the soil nitrate nitrogen content increased with the increasing altitude. For the three altitude gradients, the content of ammonium nitrogen in the bare soil increased along the increase of altitude. In the mild invasion, the order of ammonium nitrogen content was 1660 m>1220 m>1440 m. In the moderate invasion, the order of ammonium nitrogen content was 1440 m>1220 m>1660 m. In the severe invasion, the order of ammonium nitrogen content was 1660 m>1220 m>1440 m, and the intrusion of *Sophora alopecuroides* had a great influence on soil ammonium nitrogen content. The order of available phosphorus content in soil of bare land at different altitude gradients was 1660 m>1220 m>1440 m. The available phosphorus in soil of slight intrusion increased with the increasing of altitude, which was 1660m>1440 m>1220 m. However, the available phosphorus in soil of the moderate intrusion showed a decreasing trend along the increasing of altitude, which was 1220 m>1440 m>1660 m. The soil available nitrogen showed a decreasing trend with the increasing of altitude, which was 1660 m>1440 m>1220 m. Soil available potassium increased with the increasing of altitude, which was 1220 m>1440 m>1660 m. For the soil water content of the three altitudes, the soil water content of the slight intrusion, moderate intrusion and severe invasion increased by 1%, 7%, 16%, 11%, 14%, 17%, 4%, 2% and 11% in the 0—10 cm soil layer, respectively. The soil water content in the 10—20 cm soil layer increased by 4%, 4%, 13%, 10%, 7%, 12%, 32%, 40%, 48%, respectively. With the increasing of altitude, the content of easily oxidized organic carbon and soluble organic carbon increased significantly.

Keywords: Yili valley, plant invasion, *Sophora alopecuroides*, elevation, soil nutrient, active organic carbon.

外来植物入侵(exotic plant invasion)是指植物通过自然或人为由原产地传播到原先没有本种植物的地区并在该区域生长繁殖,并且对该地区的生态造成一定的威胁和破坏^[1].外来植物的入侵在当今世界已经成为了一个全球性的问题,成为了威胁和破坏生物多样性和生态环境的重要因素^[2],我国是外来植物入侵影响严重的国家之一,外来植物对我国的生态环境以及生物多样性造成了严重的危害^[3].外来植物威胁着全球的生态环境和经济发展,对社会经济及生态环境的发展造成极大损失.

苦豆子(*Sophora alopecuroides*),又名布亚(维名)、苦参草、西豆根苦豆草等,属豆科槐属多年生草本植物.苦豆子作为伊犁河谷毒害草之一,广泛分布于亚洲干旱半干旱地区,主要分布于我国甘肃、宁夏、新疆、内蒙古等省区.苦豆子为中旱生、耐盐碱,主要生长在砂质土中,具有良好的耐沙埋、抗腐蚀的特点.是我国北方地区的饲用植物资源和药用植物资源,同时是我国防风固沙的重要植物^[4].苦豆子在伊犁河谷分布较广,具有较强的入侵性,在伊宁县、霍城县和伊宁市等山地草原地区已经泛滥成灾^[4],在不加以治理对伊犁河谷草原生态环境将会带来严重的影响^[5].经项目组成员前期野外调查发现,以伊犁河谷托乎拉苏大草原为例,随着海拔梯度的升高苦豆子种群的入侵趋势逐渐减弱,而当海拔高于 1660 m 时苦豆子植物的分布基本消失.

目前,国内外对于植物入侵对土壤的土壤理化性质^[6]、土壤微生物、酶活性^[7]、土壤养分^[8]、活性有机碳、微生物环境的影响^[9]等方面研究较多.对于苦豆子植物的研究多集中于研究苦豆子的植物生理学^[10]、成分提取^[11-12]以及药用价值^[13]等方面,而对于我国干旱区苦豆子入侵对不同海拔梯度下土壤养分和活性有机碳的关系尚鲜见报道,因此,研究苦豆子入侵对干旱区伊犁河谷区域不同海拔土壤养分和活性有机碳组分的影响,解析苦豆子入侵的土壤生态学机理,从而为伊犁河谷山地草原恶性入侵类毒害草的管控提供理论依据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究区概况

研究区位于伊宁县托乎拉苏草原(N 44°03′27.47″—44°08′11.9″,E 081°31′07.72″—81°35′57.6″),海拔在 976—1660 m 之间,托乎拉苏大草原地势北高南低、由东北向西南倾斜,该区域位于伊宁县北部的山区,属于中温带干旱型内陆山地气候,年平均气温 9 ℃,年降水量 340 mm,年均蒸发量 1621 mm,多年平均日照 2900 h,无霜期 163 d.苦豆子为豆科、槐属的多年生草本植物,根系庞大,适应生长于干旱半干旱区的草原和沙地.

1.2 样地设置和土壤样品采集

采用野外及室内实验分析的方法.选取不同海拔不同盖度的苦豆子为研究对象,结合野外考察苦豆子的入侵面积大小,分别以海拔 1220 m、海拔 1440 m 和海拔 1660 m 等 3 个海拔梯度为分布界限,在不同海拔按照苦豆子的盖度,分为裸地、苦豆子轻度入侵、苦豆子中度入侵、苦豆子重度入侵的 4 个样地,每个样地设置 3 个重复,共 12 个样地.裸地为原生裸地,无植物生长;3 种类型苦豆子入侵地是按照苦豆子的盖度划分,在样地中还存在其它原生植物如猪毛蒿、小飞蓬等原生植物.每个样地设置 1 m×1 m 样方,在样方内采集 0—10 cm、10—20 cm 土壤样品.苦豆子轻度入侵的盖度为 10%—30%,中度入侵的盖度为 30%—60%,重度入侵的盖度大于 60%.

采集样品的同时,进行 GPS 定位,然后将样方地地表植被去除.分两份取样,一份鲜土用环刀采集,将鲜土方入铝盒和密封袋中,以便测量容重、水分等理化性质,另一份放入密封袋,带回室内风干,分别过 18 目和 100 目的筛子,装袋备用,用于土壤养分及有机碳的测定.

1.3 土壤主要理化性质测定

土壤含水量采用烘干法测定;土壤容重采用环刀法测定;土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定;土壤氨态氮含量采用 KCl 浸提-靛蓝比色法测定;土壤硝态氮含量采用酚二磺酸比色法测定;土壤碱解氮采用碱扩散法测定;土壤速效磷含量采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定.以上测定指标均参照鲍士旦的方法.

土壤易氧化有机碳含量测定采用 KMnO₄ 氧化法;土壤可溶性碳含量采用蒸馏水浸提,0.45 μm 滤膜过滤,总有机碳分析仪测定;土壤微生物量碳测定采用氯仿薰蒸浸提法.

1.4 数据处理

采用 Excel 2013 数据处理系统对土壤酶与土壤养分基础数据进行整理和分析;应用 SPSS Statistics 17.0 软件的单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 和皮尔逊双尾相关性分析 (Pearson 2-tails test of significance) 对不同海拔苦豆子不同入侵程度土壤间的各指标的差异性和相关性参数进行分析.

2 结果与讨论 (Result and discussion)

2.1 不同海拔苦豆子入侵对土壤无机养分的影响

如图 1 所示,在 3 个不同海拔梯度下苦豆子不同入侵程度根际土壤硝态氮的含量存在明显差异,0—10 cm 和 10—20 cm 土层中土壤硝态氮均差异显著($P<0.01$).在 0—10 cm 土层中,裸地的土壤硝态氮含量分布为,海拔 1660 m>1440 m>1220 m;苦豆子轻度入侵的土壤硝态氮含量分布为,海拔 1440 m>1660 m>1220 m;苦豆子中度入侵的土壤硝态氮含量分布为,海拔 1660 m>1440 m>1220 m;苦豆子重度入侵的土壤硝态氮含量分布为,海拔 1660 m>1440 m>1220 m.随着海拔的升高土壤硝态氮含量呈现递增,在苦豆子轻度入侵的土壤中出现差异,海拔 1440 m 处土壤硝态氮含量最高.在 10—20 cm 土层中,裸地的土壤硝态氮含量分布为,海拔 1660 m>1440 m>1220 m;苦豆子轻度入侵的土壤硝态氮含量分布为,海拔 1660 m>1440 m>1220 m;苦豆子中度入侵的土壤硝态氮含量分布为,海拔 1660 m>1440 m>1220 m;苦豆子重度入侵的土壤硝态氮含量分布为,海拔 1660 m>1220 m>1440 m.在不同海拔下裸地土壤硝态氮含量随着海拔的升高而增高,苦豆子重度入侵土壤硝态氮含量先降低后升高.

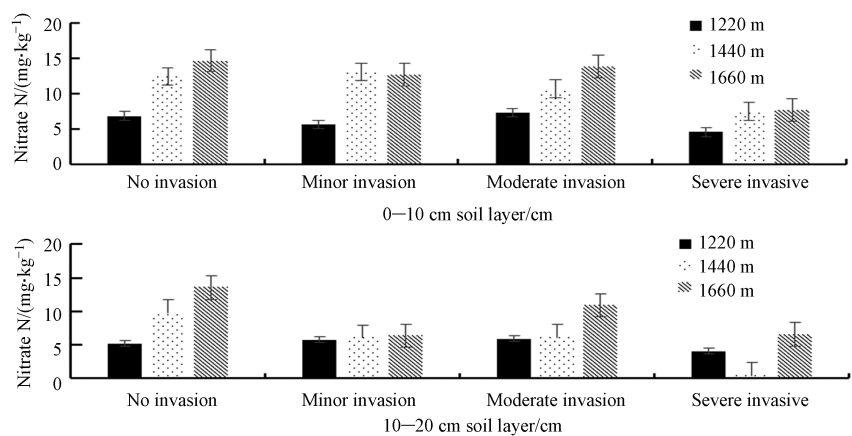


图 1 土壤硝态氮随海拔梯度的变化
Fig.1 The change of soil nitrate nitrogen along the altitudinal gradient

如图 2 所示,不同海拔 0—10 cm 土壤氨态氮含量变化范围为 8.23—26.95 mg·kg⁻¹,苦豆子不同入侵程度在不同海拔土壤氨态氮均无显著性差异($P>0.05$).在裸地中,土壤氨态氮随着海拔变化的大小顺序为,海拔 1660 m>1440 m>1220 m;在轻度入侵的土壤中,土壤氨态氮随着海拔变化的大小顺序为,海拔 1660 m>1220 m>1440 m;在中度入侵的土壤中,土壤氨态氮随着海拔变化的大小顺序为,海拔 1440 m>1220 m>1660 m;在重度入侵的土壤中,土壤氨态氮随着海拔变化的大小顺序为,海拔 1660 m>1220 m>1440 m.随着海拔的升高土壤氨态氮含量没有明显的规律.在 10—20 cm 土层中土壤氨态氮含量变化范围为 8.58—16.84 mg·kg⁻¹,3 个海拔裸地的土壤氨态氮含量 1660 m>1440 m>1220 m;3 个海拔苦豆子轻度入侵的土壤氨态氮含量 1220 m>1660 m>1440 m;3 个海拔苦豆子中度入侵的土壤氨态氮含量 1220 m>1440 m>1660 m;苦豆子重度入侵的土壤氨态氮含量 1440 m>1660 m>1220 m.由以上分析可知苦豆子入侵在一定程度上影响了土壤中氨态氮的含量,但是不同入侵程度对土壤中的氨态氮的影响也截然不同,在海拔 1220 m,相同土层深度土壤中氨态氮含量随着苦豆子的入侵程度的增加呈现先上升后下降的趋势;在海拔 1440 m,10—20 cm 土层中土壤氨态氮含量随着苦豆子的入侵程度增加而增加;在海拔 1660 m,不同深度的土壤氨态氮含量随着苦豆子的入侵程度的增加呈现无规则变化.

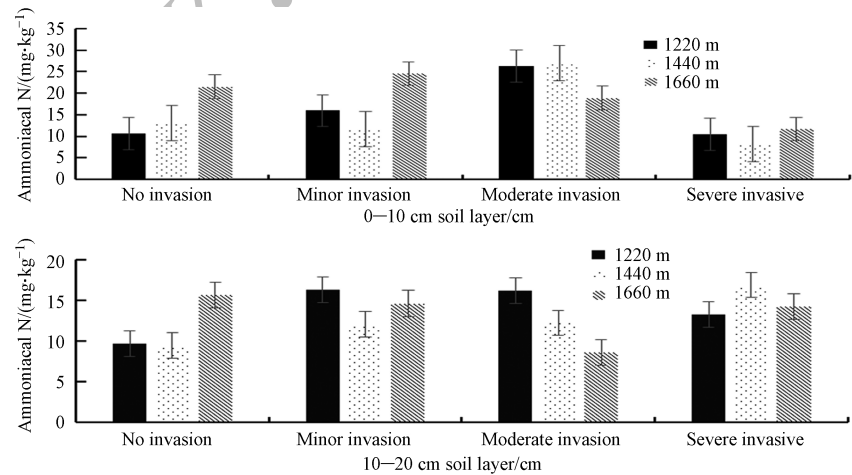


图 2 土壤氨态氮随海拔梯度的变化
Fig.2 The change of soil ammonia nitrogen along the altitudinal gradient

如图 3 所示,随海拔升高苦豆子不同入侵程度根际土壤速效磷的相关性降低($P>0.05$).在土层 0—10 cm 中,裸地的土壤速效磷含量分布为,海拔 1660 m>1220 m>1440 m;苦豆子轻度入侵的土壤速效磷含量分布为,海拔 1660 m>1440 m>1220 m;苦豆子中度入侵的土壤速效磷含量分布为,海拔 1220 m>1440 m>1660 m;苦豆子重度入侵的土壤速效磷含量分布为,海拔 1660 m>1220 m>1440 m.随着海拔的

升高,裸地与苦豆子重度入侵的土壤中的速效磷先降低后升高,苦豆子轻度入侵的土壤中的速效磷逐渐升高,苦豆子中度入侵的土壤中速效磷逐渐降低.在 10—20 cm 土层中,裸地的土壤速效磷含量分布为,海拔 1440 m>1220 m>1660 m;苦豆子轻度入侵的土壤速效磷含量随着海拔升高而下降;苦豆子中度入侵的土壤速效磷含量分布为,海拔 1220 m>1660 m>1440 m;苦豆子重度入侵的土壤速效磷含量分布为,海拔 1660 m>1440 m>1220 m.

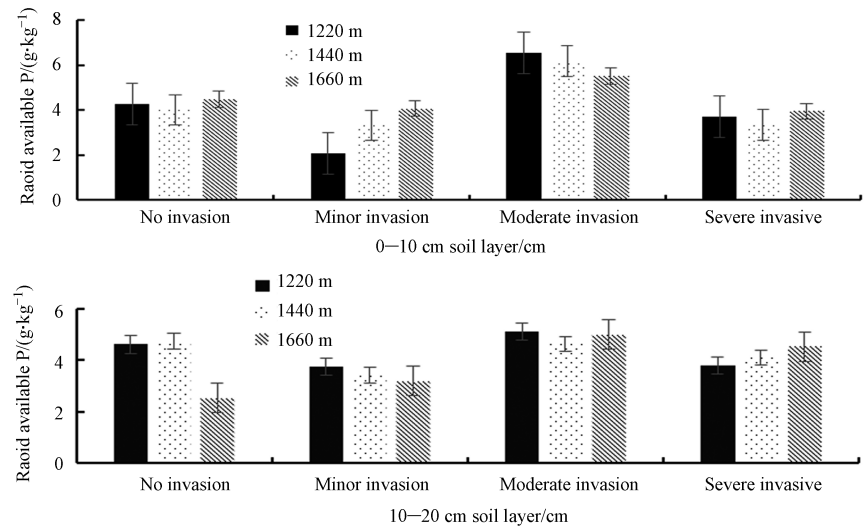


图 3 土壤速效磷随海拔梯度的变化

Fig.3 The changes of soil available phosphorus along the altitudinal gradient

如图 4 所示,在不同的海拔高度下,苦豆子入侵对土壤速效氮的相关性显著 ($P<0.01$).在土层 0—10 cm 中,3 个海拔裸地的土壤速效氮含量 1220 m>1440 m>1660 m;苦豆子轻度入侵的土壤速效氮含量 1220 m>1440 m>1660 m;苦豆子中度入侵的土壤速效氮含量 1220 m>1440 m>1660 m;苦豆子重度入侵的土壤速效氮含量比为 1220 m>1660 m>1440 m.随着海拔升高土壤中速效氮含量逐渐降低,在苦豆子重度入侵的土壤中速效氮含量随着海拔的升高而逐渐降低慢慢趋于平缓.在 10—20 cm 土层中,裸地的土壤速效氮含量分布为,海拔 1220 m>1440 m>1660 m;苦豆子轻度入侵的土壤速效氮含量分布为,海拔 1220 m>1440 m>1660 m;苦豆子中度入侵的土壤速效氮含量分布为,海拔 1220 m>1660 m>1440 m;苦豆子重度入侵的土壤速效氮含量分布为,海拔 1220 m>1440 m>1660 m.随着海拔的升高土壤速效氮大致呈现递减趋势,在苦豆子中度入侵的土壤中,土壤速效氮随着海拔的升高先降低后升高.

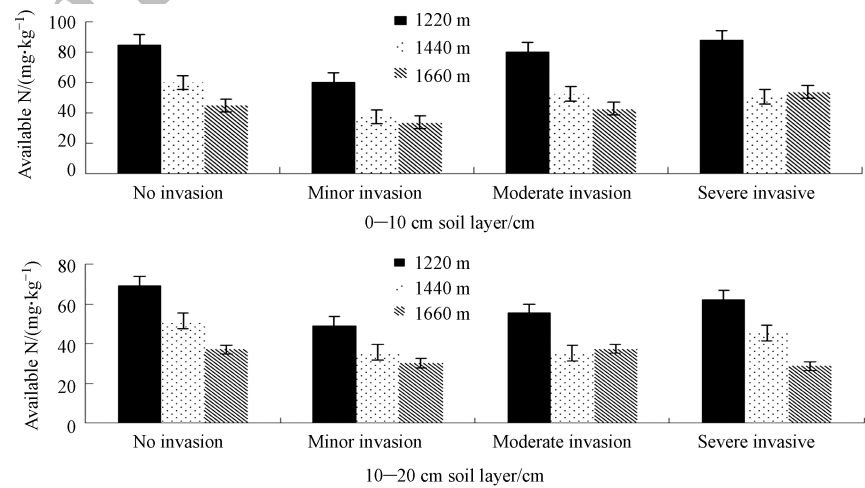


图 4 土壤速效氮随海拔梯度的变化

Fig.4 The change of soil available nitrogen along the altitudinal gradient

由图 5 可知,随海拔升高苦豆子不同入侵程度根际土壤速效钾的含量均差异显著($P<0.01$),在 0—10 cm 土层中,苦豆子土壤速效钾的含量范围在 38.66—180.54 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,裸地的土壤速效钾含量分布为,海拔 1660 m>1440 m>1220 m;苦豆子轻度入侵的土壤速效钾含量分布为,海拔 1440 m>1660 m>1220 m;苦豆子中度入侵的土壤速效钾含量分布为,海拔 1660 m>1440 m>1220 m;苦豆子重度入侵的土壤速效钾含量分布为,海拔 1660 m>1440 m>1220 m;在 10—20 cm 土层中,裸地土壤速效钾含量随着海拔上升而上升;苦豆子轻度入侵的土壤速效钾含量分布为,海拔 1660 m>1440 m>1220 m;苦豆子中度入侵的土壤速效钾含量分布为,海拔 1440 m>1660 m>1220 m;苦豆子重度入侵的土壤速效钾含量分布为,海拔 1660 m>1440 m>1220 m.随着海拔的升高土壤中速效钾含量呈现递增趋势.

不同海拔梯度的土壤无机养分含量存在差异,随着海拔的升高,硝态氮和速效钾的含量上升,与张巧明等^[14]的研究结果一致.动植物的残体、排泄物为土壤提供了大量的养分,随着海拔的升高有机质分解缓慢有利于土壤无机养分的积累^[15],而土壤中的氮元素主要也是来自动植物残体的分解,从而导致苦豆子相同入侵程度土壤活性也大致相同,微生物分解产生的硝态氮和速效钾含量大致相同进一步证明了海拔梯度的变化对硝态氮和速效钾的影响远大于苦豆子扩散本身的影响.

苦豆子的入侵改变了土壤中各无机养分的含量,植物通过根系吸收、分解、转化土壤中的养分,将其生存环境转化为适合自身生长的环境.随着海拔的升高,光照、水分、温度都会产生变化,土壤无机养分含量也出现了不同,因此苦豆子的生长也存在差异,受高海拔的限制,因此当海拔超过 1660 m 时苦豆子种群数量呈明显下降趋势.

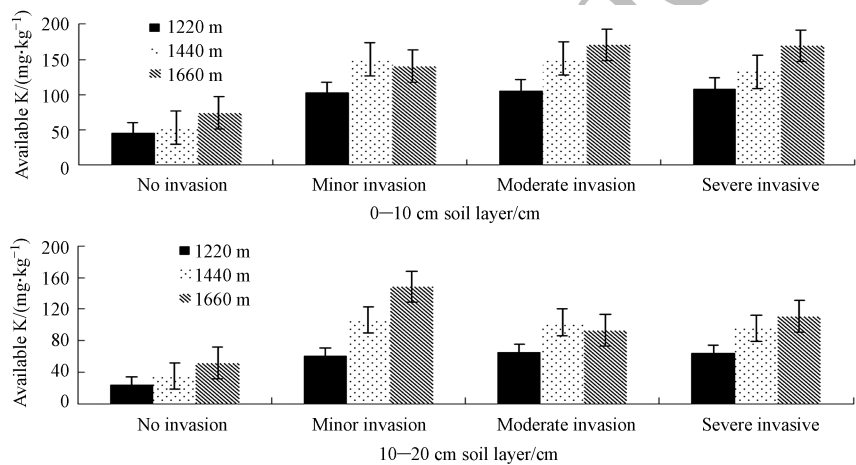


图 5 土壤速效钾含量随海拔梯度的变化

Fig.5 The change of soil available potassium content along the altitudinal gradient

2.2 不同海拔苦豆子入侵对土壤理化性质的影响

由表 1 可知,4 种苦豆子入侵土壤 0—10 cm 及 10—20 cm 土层的有机质差异性显著($P<0.01$),4 种苦豆子入侵土壤有机质的含量顺序为:苦豆子重度入侵>苦豆子中度入侵>苦豆子轻度入侵>裸地.在不同海拔下苦豆子根际土壤有机质含量随着海拔升高而递减.4 种典型苦豆子分布情况中,在海拔 1220 m 和 1440 m,土壤容重随着苦豆子的入侵程度的增加先下降后上升,在海拔 1660 m,土壤容重随着苦豆子入侵程度的增加先上升后下降,;土壤容重随着海拔的升高,逐渐降低.3 种海拔土壤水分含量高低顺序:海拔 1660 m>1440 m>1220 m,随着海拔的升高土壤水分降低,海拔越高苦豆子覆盖度也越低,苦豆子的空间分布度也相应下降.在 0—10 cm 土层中,海拔 1220 m 苦豆子轻度入侵、中度入侵和重度入侵土壤含水量分别比裸地土壤含水量增加了 1%、7%、16%;海拔 1440 m 苦豆子轻度入侵、中度入侵和重度入侵土壤含水量分别比裸地土壤含水量增加了 11%、14%、17%;海拔 1660 m 苦豆子轻度入侵、中度入侵和重度入侵土壤含水量分别比裸地土壤含水量增加了 4%、2%、11%.在 10—20 cm 土层中,海拔 1220 m 苦豆子轻度入侵、中度入侵和重度入侵土壤含水量分别比裸地土壤含水量增加了 4%、4%、13%;海拔 1440 m 苦豆子轻度入侵、中度入侵和重度入侵土壤含水量分别比裸地土壤含水量增加了 10%、7%、12%;海拔 1660 m 苦豆子轻度入侵、中度入侵和重度入侵土壤含水量分别比裸地土壤含水量增加了 32%、40%、48%.

土壤是在气候、植被、地形、母质等因子的综合作用下形成的,并随着植被演替的进行总是在不断发生变化,植物通过影响土壤环境从而形成有利于自身生长的生境被认为是植物竞争演替的重要驱动机制之一^[16-18].植物通过自身条件的变化,对土壤理化性质产生影响,包括增加、减少和无影响 3 种效应^[19-20].

本研究结果显示,在同一海拔高度,苦豆子的入侵程度不同,随着苦豆子入侵的增加土壤水分和有机质增加.随着海拔的升高土壤有机质含量呈现下降趋势,这与李丹维等^[21]对太白山不同海拔土壤的研究和林建平等^[22]对南方典型丘陵山区耕地不同海拔的研究中所得结论相反.苦豆子的入侵显著影响了土壤中水分与有机质,苦豆子的扩散会增加土壤中的含水量,植物与土壤之间的相互作用导致植物生长环境的改变^[23],海拔越高温度越低,土壤中水分增加,抑制有机质的矿化,苦豆子生长受到抑制,土壤表层植被凋落物减少,土壤养分多来自凋谢枯萎的植物以及植物根部的分解^[24],有研究表明,植物对土壤中各种养分的选择性吸收,以及凋落物分解速率不同造成了土壤有机质、水分的差异^[25],海拔与苦豆子入侵都对土壤有机质和土壤水分影响较大.苦豆子的生长会影响土壤有机质,使不同入侵程度土壤有机质存在差异.随着苦豆子入侵程度的加剧,其产生的动植物残体越多,微生物的活性也就越大,对凋落物以及土壤养分的分解速度也会加快,从而增加土壤有机质含量.

表 1 土壤理化性质
Table 1 Soil basic physico-chemical properties of experiment

海拔 A Altitude/m	入侵程度 Degree of invasion	土层 Soillayer/cm	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	土壤水分 Soil moisture/%	土壤有机质 Soil organic carbon/ (g·kg ⁻¹)
1220 m	裸地 No invasion	0—10	1.376	4.96	18.89
		10—20	1.344	5.33	17.07
	轻度入侵 Minor invasion	0—10	1.351	5.01	21.53
		10—20	1.374	5.53	19.72
	中度入侵 Moderate invasion	0—10	1.154	5.30	26.73
		10—20	1.208	5.53	24.90
	重度入侵 Severe invasive	0—10	1.387	5.76	28.11
		10—20	1.410	6.03	26.38
1440 m	裸地 No invasion	0—10	1.304	6.41	17.59
		10—20	1.155	6.97	15.97
	轻度入侵 Minor invasion	0—10	1.250	7.13	20.33
		10—20	1.046	7.64	19.27
	中度入侵 Moderate invasion	0—10	1.170	7.33	23.99
		10—20	1.043	7.43	20.25
	重度入侵 Severe invasive	0—10	1.354	7.51	25.06
		10—20	1.192	7.84	23.80
1660 m	裸地 No invasion	0—10	1.120	9.84	16.48
		10—20	1.216	7.43	15.83
	轻度入侵 Minor invasion	0—10	1.262	10.20	19.42
		10—20	1.266	9.84	17.66
	中度入侵 Moderate invasion	0—10	1.102	10.00	21.99
		10—20	1.198	10.43	20.88
	重度入侵 Severe invasive	0—10	0.927	10.89	23.63
		10—20	0.910	11.01	21.16

2.3 不同海拔苦豆子入侵对土壤活性有机碳组分的影响

如图 6 所示,不同海拔苦豆子 4 种典型入侵类型地土壤可溶性碳(DOC,mg·kg⁻¹),不同海拔土壤可溶性碳含量在 0.04—0.35 mg·kg⁻¹.在 0—10 cm 土层中,裸地的土壤可溶性碳含量为,海拔 1660 m>1440 m>1220 m;苦豆子轻度入侵的土壤可溶性碳含量为,海拔 1660 m>1220 m>1440 m;苦豆子中度入侵的土壤可溶性碳含量为,海拔 1660 m>1440 m>1220 m;苦豆子重度入侵的土壤可溶性碳含量为,海拔 1660 m>1220 m>1440 m.

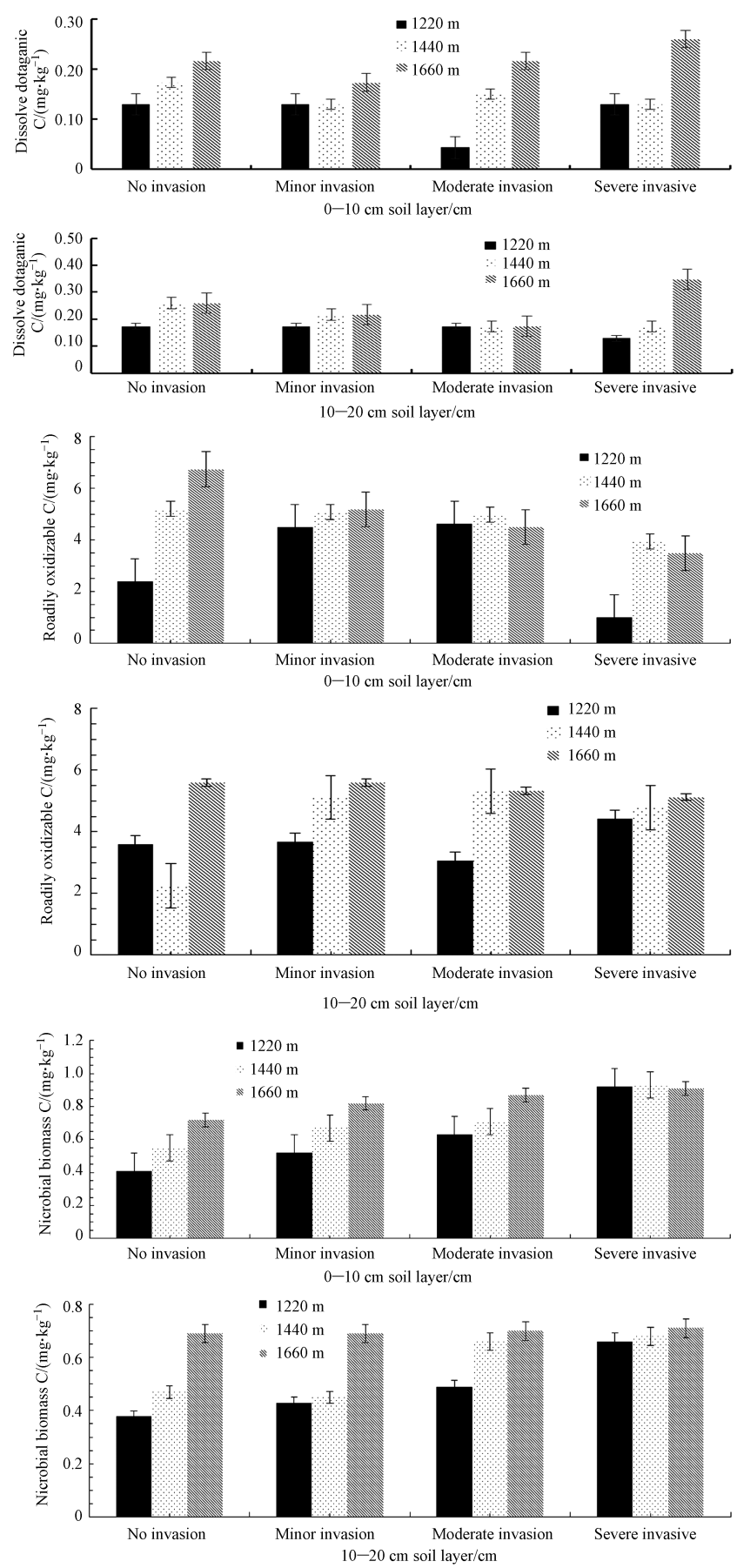


图 6 土壤活性有机碳含量随海拔梯度的变化

Fig.6 Changes of soil active organic carbon content with altitude gradient

不同海拔苦豆子入侵的地土壤易氧化有机碳(ROOC, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)含量范围在 1.00—6.74 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 在 0—10 cm 土层中, 裸地和苦豆子轻度入侵的土壤易氧化有机碳含量均为, 海拔 1660 m>1440 m>1220 m; 苦豆子中度入侵的土壤易氧化有机碳含量为, 海拔 1440 m>1220 m>1660 m; 苦豆子重度入侵的土壤易氧化有机碳含量为, 海拔 1440 m>1660 m>1220 m. 土壤微生物量碳(MBC)是土壤碳循环中最为活跃的部分, 裸地中的土壤微生物量碳含量为, 海拔 1660 m>1440 m>1220 m. 苦豆子轻度入侵的土壤微生物量碳含量为, 海拔 1660 m>1440 m>1220 m. 苦豆子中度入侵的土壤微生物量碳含量为, 海拔 1660 m>1440 m>1220 m. 苦豆子重度入侵的土壤微生物量碳含量为, 海拔 1440 m>1220 m>1660 m. 随着海拔的升高, 苦豆子轻度入侵与苦豆子重度入侵的土壤可溶性碳含量先降低后升高. 随着海拔的升高, 土壤易氧化有机碳含量逐渐增高, 其中苦豆子中、重度入侵出现一定差异; 随着海拔的升高, 易氧化有机碳含量先升高后下降. 在 10—20 cm 土层中, 不同海拔 4 种苦豆子入侵的土壤可溶性碳含量为, 海拔 1660 m>1440 m>1220 m, 土壤易氧化有机碳在 3 个海拔梯度间的变化为, 在裸地的土壤中随着海拔的升高, 易氧化有机碳含量先下降后升高; 在苦豆子轻度、中度、重度入侵的土壤中随着海拔的升高, 易氧化有机碳呈现升高趋势, 土层微生物量碳随着苦豆子入侵程度的增加土壤中微生物量碳含量增加, 土壤微生物量碳含量随着海拔的升高而增加; 随着海拔的升高土壤可溶性碳含量逐渐升高, 在苦豆子中度入侵的土壤中升高趋势趋于平缓.

土壤活性有机碳尽管在土壤总有机碳中所占含量很少, 但是却直接参与土壤生物的一系列活动^[26], 其数量可以用来衡量土壤碳库平衡和土壤肥力的敏感因子^[27]. 随着海拔的升高往往会发生环境因子的变化, 为研究不同海拔梯度植物入侵对土壤活性有机碳的影响提供了良好的基础^[28]. 本研究显示, 苦豆子入侵下土壤微生物量碳随海拔升高而增加, 土壤可溶性碳随海拔升高而升高, 与崔鸿侠^[29]、周焱^[30]等实验的研究结果一致. 同一海拔下, 苦豆子的入侵对土壤可溶性碳变化没有产生明显影响, 土壤可溶性碳的含量可以表示土壤微生物消耗能力的情况, 土壤微生物量碳是土壤中微生物死亡后释放出的有机碳, 微生物量碳可以表示土壤中微生物的数量和活性^[31], 因此表明随着海拔的升高土壤微生物消耗能量上升而其活性增加, 从而加速了土壤有机质的矿化. 苦豆子的入侵没有明显改变土壤可溶性碳的含量, 然而随着海拔的上升土壤可溶性碳含量也不断增加, 这表明苦豆子入侵对土壤微生物的数量以及活性没有影响, 但是海拔的上升会增加微生物的数量与活性.

同一海拔下, 易氧化有机碳与苦豆子的入侵程度呈现出反比的趋势, 海拔对其含量没有产生明显影响. 土壤的含水量上升, 使得土壤中产生微生物容易分解的碳源^[32], 增加了土壤微生物的活性, 促进了植物残体的分解, 土壤易氧化有机碳可以表示土壤中有机质含量的大小, 易氧化有机碳主要是植物凋落物与根系分泌物经过微生物分解所得, 其含量的降低可能是由于苦豆子的扩散增加了土壤中的微生物活性, 苦豆子根系分泌物微生物分解困难, 使得土壤活性有机碳的分解损失量增加, 土壤易氧化有机碳含量降低.

3 结论(Conclusion)

通过对不同海拔苦豆子入侵对土壤影响的研究, 发现苦豆子在不同海拔的入侵对土壤无机养分和活性有机碳组分有一定的影响, 但是对土壤理化性质影响较小. 表现出苦豆子可以更为显著地改善土壤无机养分与活性有机碳, 即通过改善土壤环境, 而快速地获得养分有效性和活性有机碳组分的能力. 随着海拔的不断升高土壤中水分含量上升, 苦豆子在干旱地区涨势较大, 而在水分过多的土地会抑制苦豆子植物的生长状况, 以至于在海拔高于 1660 m 处难以见到成群分布的苦豆子.

参考文献(References)

[1] 刘建, 李钧敏, 余华, 等. 植物功能性状与外来植物入侵[J]. 生物多样性, 2010, 18(6):569-576.
LIU J, LI J M, YU H, et al. The relationship between functional traits and invasiveness of alien plants[J]. Biodiversity Science, 2010, 18(6):569-576(in Chinese).
[2] HOOPER D U, ADAIR E C, CARDINALE B J. A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change[J]. Nature, 2012, 486(7401):105-108.

- [3] 丁晖,徐海根,强胜,等.中国生物入侵的现状与趋势[J].生态与农村环境学报,2011,27(3):35-41.
DING H, XU H G, QIANG S, et al. Status quo and trends of biological invasion in China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2011, 27(3):35-41 (in Chinese).
- [4] 崔东.伊犁河谷苦豆子种群不同扩散阶段的植物与土壤生态化学计量学特征研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2018.
CUI D. Study on the ecological stoichiometric characteristics of plant and soil in different diffusion stages of *Sophora alopecuroides* population in Yili River valley [D]. Urumchi: Xinjiang University, 2018 (in Chinese).
- [5] 赵婧,曹磊.入侵植物对洪泽湖湿地杨树林土壤微生物特性和酶活性的影响[J].生态环境学报,2018,27(11):2039-2046.
ZHAO J, CAO L. Effects of invasive plants on soil microbial properties and soil enzyme activities of poplar forest in Hung-tse Lake Wetland [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(11):2039-2046 (in Chinese).
- [6] 罗旦,陈吉祥,程琳,等.陕北沙化区3种主要植物根际土壤细菌多样性与土壤理化性质相关性分析[J].干旱区资源与环境,2019,33(3):151-157.
LUO D, CHEN J X, CHENG L, et al. Analysis of bacteria diversity in the rhizosphere soil of three main plants and its correlation with the soil physical properties in the desertification area of northern Shaanxi [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(3):151-157 (in Chinese).
- [7] 向仰州,刘英,何季,等.生草栽培对刺梨园土壤养分、微生物和酶活性的影响[J].北方园艺,2018(6):96-101.
XIANG Y Z, LIU Y, HE J, et al. Effect of sod-culture on soil nutrients, microorganisms and enzyme activities in *Rosa roxburghii* Tratt. orchard [J]. Northern Horticulture, 2018(6):96-101 (in Chinese).
- [8] 张雨洁,王斌,李正才,等.不同树龄香榧土壤有机碳特征及其与土壤养分的关系[J].西北植物学报,2018,38(8):149-157.
ZHANG Y J, WANG B, LI Z C, et al. Relationships between soil organic carbon characteristics and soil nutrients for different tree-age *Torreya grandis* [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2018, 38(8):149-157 (in Chinese).
- [9] 李勇,黄小芳,丁万隆.根系分泌物及其对植物根际土壤微生态环境的影响[J].华北农学报,2008,23(S1):182-186.
LI Y, HUANG X F, DING W L. Root exudates and their effects on plant rhizosphere soil micro-ecology environment [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2008, 23(S1):182-186 (in Chinese).
- [10] 李艳艳,冯俊涛,张兴,等.苦豆子化学成分及其生物活性研究进展[J].西北农业学报,2005,14(2):133-136.
LI Y Y, FENG J T, ZHANG X, et al. Advance in research of chemical ingredients from *Sophora alopecuroides* L. and its bioactivities [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2005, 14(2):133-136 (in Chinese).
- [11] 周福生,穆青.野生植物苦豆子的化学成分和主要药理作用[J].中国野生植物资源,2006,25(4):1-3.
ZHOU F S, MU Q. Chemical constituents and pharmacological activities of *Sophora alopecuroides* L. [J]. Chinese Wild Plant Resources, 2006, 25(4):1-3 (in Chinese).
- [12] 张沙沙.苦豆子根提取物杀菌剂研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2013.
ZHANG S S. Study on fungicide formulation based on extract from root of *Sophora Alopecuroides* L. [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forest Science and Technology University, 2013 (in Chinese).
- [13] 高红英,李国玉,王航宇,等.新疆苦豆子种子中生物碱类化学成分的研究[J].石河子大学学报(自然科学版),2011,29(1):75-78.
GAO H Y, LI G Y, WANG H Y, et al. Chemical constituents from the seeds of *Sophora Alopecuroides* L. [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2011, 29(1):75-78 (in Chinese).
- [14] 张巧明,王得祥,龚明贵,等.秦岭火地塘林区不同海拔森林土壤理化性质[J].水土保持学报,2011,25(5):69-73.
ZHANG Q M, WANG D X, GONG M G, et al. Changes in physicochemical properties of forest soil along different altitudes in Huoditang of Qinling Mountains [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5):69-73 (in Chinese).
- [15] 袁颖丹,李志,张文元,等.武功山山地草甸不同海拔土壤氮素分布及其与土壤物理性质的关系[J].中南林业科技大学学报,2016,36(10):108-113.
YUAN Y D, LI Z, ZHANG W Y, et al. Soil nitrogen distribution and its correlation with soil physical properties in different altitude in mountain meadow of Wugong mountain [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016, 36(10):108-113 (in Chinese).
- [16] 白静,严锦钰,何东进,等.互花米草入侵对闽东滨海湿地红树林土壤理化性质和酶活性的影响[J].北京林业大学学报,2017,39(1):70-77.
BAI J, YAN J Y, HE D J, et al. Effects of *Spartina alterniflora* invasion in eastern Fujian coastal wetland on the physicochemical properties and enzyme activities of mangrove soil [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(1):70-77 (in Chinese).
- [17] 王绍强,周成虎,刘纪远,等.东北地区陆地碳循环平衡模拟分析[J].地理学报,2001,56(4):390-400.
WANG S Q, ZHOU C H, LIU J Y, et al. Simulation analyses of terrestrial carbon cycle balance model in Northeast China [J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(4):390-400 (in Chinese).
- [18] 孙维侠,史学正,于东升,等.我国东北地区土壤有机碳密度和储量的估算研究[J].土壤学报,2004,41(2):298-300.
SUN W X, SHI X Z, YU D S, et al. Estimation of soil organic carbon density and storage of Northeast China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(2):298-300 (in Chinese).

- [19] 李忠, 孙波, 林心雄. 我国东部土壤有机碳的密度及转化的控制因素[J]. 地理科学, 2001, 21(4): 301-307.
LI Z, SUN B, LIN X X. Density of soil organic carbon and the factors controlling its turnover in East China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21(4): 301-307 (in Chinese).
- [20] 王刚, 杨文斌, 王国祥, 等. 互花米草海向入侵对土壤有机碳组分、来源和分布的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2474-2483.
WANG G, YANG W B, WANG G X, et al. The effect of *Spartina alterniflora* seaward invasion on soil organic carbon fractions, sources and distribution[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2474-2483 (in Chinese).
- [21] 李丹维, 王紫泉, 田海霞, 等. 太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 160-170.
LI D W, WANG Z Q, TIAN H X, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus contents in soils on Taibai Mountain and their ecological stoichiometry relative to elevation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(1): 160-170 (in Chinese).
- [22] 林建平, 邓爱珍, 赵小敏, 等. 南方典型丘陵山区不同高程耕地土壤养分变化特征分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 300-309.
LIN J P, DENG A Z, ZHAO X M, et al. Variation characteristics of soil nutrients of cultivated land in different elevation fields in typical hilly areas of southern mountains[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 300-309 (in Chinese).
- [23] 梁雷, 叶小齐, 吴明, 等. 加拿大一枝黄花入侵对杭州湾湿地围垦区土壤养分及活性有机碳组分的影响[J]. 土壤, 2016, 48(4): 680-685.
LIANG L, YE X Q, WU M, et al. Invasion effects of *Solidago canadensis* on soil nutrients and active organic carbon components in reclamation district of Hangzhou Bay Wetland[J]. Soils, 2016, 48(4): 680-685 (in Chinese).
- [24] 尚天翠, 刘影, 赵玉. 新疆野生樱桃李林自然保护区不同海拔梯度土壤养分特征及相关性分析[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(8): 119-127.
SHANG T C, LIU L, ZHAO Y. Nutrient characteristics and correlation analysis of soil under *Prunus divaricata* in Xinjiang[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(8): 119-127 (in Chinese).
- [25] 李占斌, 周波, 马田田, 等. 黄土丘陵区生态治理对土壤碳氮磷及其化学计量特征的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 312-318.
LI Z B, ZHOU B, MA T T, et al. Effects of ecological management on characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus and their stoichiometry in Loess Hilly Region, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6): 312-318 (in Chinese).
- [26] 孙伟军, 方晰, 项文化, 等. 湘中丘陵区不同演替阶段森林土壤活性有机碳库特征[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7765-7773.
SUN W J, FANG X, XIANG W H, et al. Active pools of soil organic carbon in subtropical forests at different successional stages in Central Hunan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7768-7773 (in Chinese).
- [27] HAYNES R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: An overview[J]. Advances in Agronomy, 2005, 85(4): 221-268.
- [28] 张参参, 吴小刚, 刘斌, 等. 江西九连山不同海拔梯度土壤有机碳的变异规律[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(2): 19-28.
ZHANG C C, WU X G, LIU B, et al. Variations in soil organic carbon along an altitudinal gradient of Jiulian Mountain in Jiangxi Province of eastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(2): 19-28 (in Chinese).
- [29] 崔鸿侠, 潘磊, 黄志霖, 等. 神农架不同海拔巴山冷杉林土壤活性有机碳特征[J]. 西南林业大学学报, 2017, 37(1): 110-115.
CUI H X, PAN L, HUANG Z L, et al. Characteristic of active soil organic carbon of *Abies fargesii* forest along an elevation gradient in Shennongjia[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2017, 37(1): 110-115 (in Chinese).
- [30] 周焱, 徐宪根, 阮宏华, 等. 武夷山不同海拔土壤水溶性有机碳的含量特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2009, 33(4): 48-52.
ZHOU Y, XU X G, RUAN H H, et al. Content character of WSOC among four vegetation types along an elevation gradients in Wuyi Mountain[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2009, 33(4): 48-52 (in Chinese).
- [31] 梁雷, 叶小齐, 吴明, 等. 加拿大一枝黄花入侵对杭州湾湿地围垦区土壤酶活性的影响[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2018, 17(4): 391-396.
LIANG L, YE X Q, WU M, et al. Effect *Solidago canadensis* Invasion on soil enzyme activities in the Hangzhou Bay Reclaimed Wetlands [J]. Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition), 2018, 17(4): 391-396 (in Chinese).
- [32] MIN K, KANG H, LEE D. Effects of ammonium and nitrate additions on carbon mineralization in wetland soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011, 43(12): 2461-2469.