

青藏高原高寒草原草甸土壤团聚体及养分因子变化特征

于文竹, 魏霞, 赵恒策, 贺燕, 何晓波, 吴晓东

(兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘要: 为探讨青藏高原高寒草原草甸的土壤团聚体稳定性及有机碳等养分因子的变化分布, 在青海省三江源区高寒地带选取样点分层采集土壤样品, 进行室内测定并分析 2 种植被下土壤团聚体和养分因子的变化特征。结果表明: 研究区土壤 >0.25 mm 水稳性团聚体含量 (WSA)、平均质量直径 (MWD) 与几何平均直径 (GMD) 均为草甸 $>$ 草原, 而分形维数 (D) 与结构体破坏率 (PAD) 为草原 $>$ 草甸, 即青藏高原高寒草甸土壤团聚体稳定性大于高寒草原。高寒草甸土壤稳定性及养分含量随土层深度增加显著降低 ($P < 0.05$), 草原土壤稳定性和养分含量随土层深度无显著变化趋势。高寒草原土壤稳定性与各养分含量随海拔升高而降低, 高寒草甸土壤团聚体稳定性与养分随海拔升高先降低后增加。高寒草甸土壤团聚度与养分含量呈极显著相关 ($P < 0.01$), 高寒草原土壤团聚度与养分无显著相关; >4 , $4\sim2$, $2\sim1$ mm 粒级团聚体是影响研究区土壤养分含量的主导粒径, 其稳定性程度主要受大团聚体作用。研究结果对于青藏高原土壤质量评价、生态环境保护具有重要科学意义。

关键词: 青藏高原; 高寒草原、草甸; 团聚体; 养分; 海拔

中图分类号: S152

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)06-0301-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.06.042

Changes of Soil Aggregates and Nutrient Factors in Alpine Grassland and Alpine Meadow of Qinghai Tibet Plateau

YU Wenzhu, WEI Xia, ZHAO Hengce, HE Yan, HE Xiaobo, WU Xiaodong

(College of Earth Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Abstract: In order to study the stability of soil aggregates and the distribution of organic carbon and other nutrients in alpine grassland and alpine meadow on the Qinghai Tibet Plateau, in this study, soil samples were collected from the alpine region of the Qinghai Tibet Plateau, the changes of soil aggregates and nutrient factors were measured and analyzed in the laboratory. The results showed that: >0.25 mm percentage of water-stable aggregates (WSA), mean weight diameter (MWD), and geometric mean diameter (GMD) in the alpine soil of the Tibetan plateau were meadow $>$ grassland, the fractal dimension (D) and the aggregate processing damage rate (PAD) were grassland $>$ meadow. Therefore, on the Qinghai Tibet Plateau the stability of soil aggregates in the alpine meadow was higher than that in the alpine grassland. The soil stability and nutrient content of alpine meadow decreased significantly with the increase of soil depth ($P < 0.05$), while the soil stability and nutrient content of grassland showed no significant change trend with the increase of soil depth. The soil stability and nutrient content of alpine grassland decreased with the increase of altitude, while that of alpine meadow decreased firstly and then increased with the increase of altitude. There was a significant correlation between soil agglomeration degree and nutrient content in alpine meadow ($P < 0.01$), while there was no significant correlation between soil agglomeration degree and nutrient content in alpine grassland. Aggregates of >4 , $4\sim2$, and $2\sim1$ mm were the main factors that affect the content of soil nutrients, and the stability of soil aggregates was mainly affected by macro-aggregates. The results of the study have important scientific significance for soil quality evaluation and ecological environment protection in the Qinghai Tibet Plateau.

收稿日期: 2020-04-02

资助项目: 国家自然科学基金项目 (51679115); 兰州大学西部环境教育部重点实验室开放基金及兰州大学中央高校基本科研业务费专项 (lzujbky-2018-kb01)

第一作者: 于文竹 (1996—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事水文及水资源、土壤侵蚀与土壤可蚀性研究。E-mail: yuwzh18@lzu.edu.cn

通信作者: 魏霞 (1980—), 女, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持、水文学及水资源学等方面的研究。E-mail: weix@lzu.edu.cn

Keywords: Qinghai Tibet Plateau; alpine grassland and meadow; aggregates; nutrient; altitude

“世界屋脊”青藏高原是黄河、长江及澜沧江的源头^[1],它深刻影响着我国的气候及气象条件,对我国生态环境有着重要的保护作用,甚至对亚洲以及全球气候都具有重要影响^[2]。开展青藏高原土壤结构稳定性研究对保护青藏高原生态环境、提高区域持续发展意义重大^[3]。土壤团聚体是土壤结构的基本单元和植物养分的重要载体,其稳定性是评价土壤结构与功能的主要参数^[4]。土壤团聚体稳定性的评价指标有: >0.25 mm 水稳性团聚体含量(WSA)、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、土壤团聚体分形维数(D)^[5]、平均重量比表面积(MWSSA)以及团聚体破坏率(PAD)^[6]。WSA 可直接表示土壤团聚度^[7],MWD 和 GMD 可表示土壤团聚体大小分布状况,WSA、MWD、GMD 越大,表示土壤团聚度越高,稳定性越强^[8]。 D 与 MWSSA 也是表征土壤团聚结构的有效指标^[9],其值越小,土壤团聚度越高^[10]。PAD 表示团聚体破坏的程度,其值越小,土壤团聚体的稳定性越高^[11-12]。目前,有关团聚体稳定性及养分分布的研究较多,主要集中在土壤团聚体随土层深度的变化^[13]、团聚体与土壤养分的关系^[14-16],以及土壤养分与海拔的关系^[17-18],但多数研究主要集中在黄土高原^[10]、东北平原^[19-20]以及关中地区^[21]等,由于海拔高、气候寒冷等环境恶劣性,在青藏高原开展的相关研究十分欠缺,其适用性也有待验证。鉴于此,本文以青藏高原 2 种典型高寒植被为研究对象,进行野外土样采集、室内试验测定并结合相关分析,研究土壤团聚体及养分因子在不同植被类型、不同土层深度及不同海拔下的差异,为系统认识青藏高原高寒地区的土壤特性及养分分布提供一定依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域地处青藏高原中部,海拔范围为 4 200~5 300 m,地势绵延起伏,四周由唐古拉山、昆仑山、巴颜格拉山和阿尼玛卿山脉构成地形框架。属于典型高寒半干旱气候,常年气温低于 0℃,干湿季分明,太阳辐射强,水热同期。受水热条件的影响,青藏高原植被类型主要为高寒草原和高寒草甸,高寒草原植被覆盖度较小,植物多样性相对较小,植被类型主要有紫花针茅(*Stipa purpurea* Griseb.)和青藏苔草(*Carex moorcroftii* Falc.Ex Boott);高寒草甸面积分布广、种类丰富,植被类型以异针茅(*Stipa aliena* Keng)、短轴嵩草(*Kobresia vidua*)、矮生嵩草(*Kobresia humilis*)等优势种群为主。土壤类型以沼泽土、灰褐土、栗钙土为主,土壤厚度不大且质地较粗,养分贫瘠肥力不高^[2]。

1.2 土样采集

于 2017 年 6 月进行第 1 次土样采集,取样点为 9 个典型高寒草原样点以及 4 个典型高寒草甸样点,分别使用土样袋收集土壤 1 kg 左右。于 2017 年 9 月进行第 2 次土样采集,取样点为 10 个典型高寒草原样点以及 6 个典型高寒草甸样点,分别在每个样地采集 0—10,10—20,20—30,30—40,40—50,50—60 cm 土层土壤样品。共计 19 个高寒草原样点和 10 个高寒草甸样点,采样点海拔分布范围为 4 219~5 233 m,经纬度分布范围为 33°00′—35°43′N,91°40′—99°30′E。

1.3 样品测定与计算分析

将采集样品放置实验室进行风干等前期处理,除去石块瓦砾、植物根须残渣等。采用湿筛法^[22]测定水稳性团聚体:称取过 6 mm 筛孔的风干土样 25 g,平铺置于 TTF-100 型团聚体分析仪的套筛中(各孔径自顶向下依次为 4,2,1,0.25,0.038 mm),以 30 次/min 的频率振荡,并将套筛里的土样用布氏漏斗抽滤于滤纸,烘干称重扫入装有六偏磷酸钠的铝盒内,放入恒温摇床中以 150 r/min 振荡 12 h,再次抽滤于同一滤纸,计算得各级孔径团聚体质量。采用 $H_2SO_4-K_2Cr_2O_7$ 外加热法测定土壤有机碳(SOC)含量;采用 Smartchem200 全自动化学分析仪测定土壤全氮(TN)含量和全磷(TP)含量。

表征土壤团聚度指标 WSA、MWD、GMD、MWSSA、分形维数 D ^[5]及 PAD 计算公式为:

$$WSA = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} \quad (1)$$

式中:WSA 为水稳性团聚体粒径 $r>0.25$ mm 的百分含量(%); $M_{r>0.25}$ 为粒径 $r>0.25$ mm 团聚体累计质量(g); M_T 为土壤各粒径团聚体质量总和(g)。

$$MWD = \sum_{i=1}^n \overline{R_i} W_i \quad (2)$$

$$GMD = \exp\left[\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln \overline{R_i}}{\sum_{i=1}^n W_i}\right] \quad (3)$$

$$MWSSA = \sum_{i=1}^n \frac{6W_i}{\rho_i \overline{R_i}} \quad (4)$$

$$\lg\left[\frac{M(r<\overline{R_i})}{M_T}\right] = (3-D) \lg\left[\frac{\overline{R_i}}{R_{\max}}\right] \quad (5)$$

式中:MWD 为土壤平均质量直径(mm); $\overline{R_i}$ 为某粒级的平均直径(mm); W_i 是第 i 级粒径的团聚体质量百分比(%);GMD 为团聚体几何平均直径(mm);MWSSA 为平均重量比表面积(cm^2/g); ρ_i 为 2.65 g/cm^3 ; D 为土壤团聚体分形维数; $R_{\max}$ 为最大粒径团聚体平均直径(mm)。

$$PAD=\frac{(W_d-W_s)}{W_d}\times 100\%$$

(6)

式中:PAD 为土壤结构体破坏率(%); W_d 为粒径 $>0.25\text{ mm}$ 的机械性团聚体质量百分比(%); W_s 为粒径 $>0.25\text{ mm}$ 的水稳定性团聚体质量百分比(%)。

1.4 数据处理与统计分析

采用 Microsoft Excel 进行数据计算及作图。运用 IBM SPSS Statistics 19 软件结合单因素方差分析(One-way ANOVA)以及最小显著差异法(LSD)对不同植被不同土层深度的团聚体指标、养分含量进行统计分析。运用 Pearson 系数相关分析法得出团聚体指标、养分因子和各粒径之间的相关性。

2 结果与分析

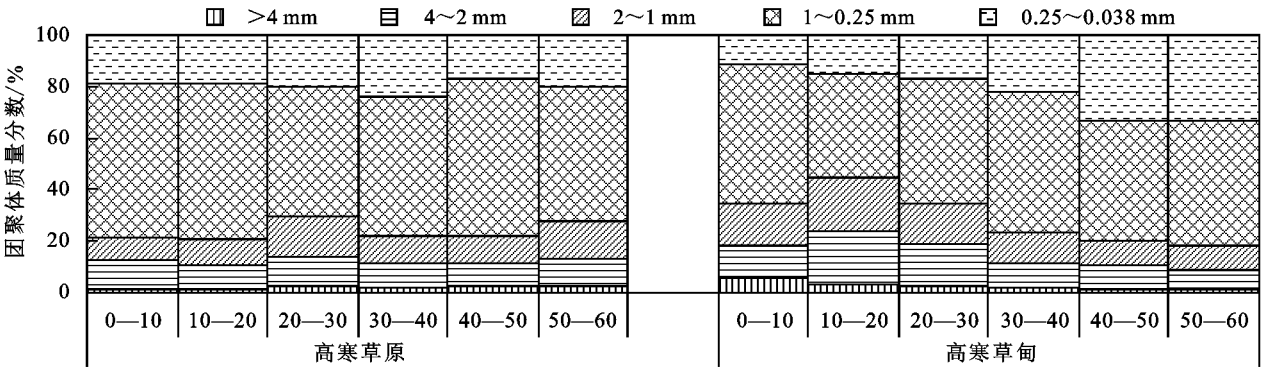


图1 青藏高原高寒草原草甸不同土层各粒径团聚体含量质量分数

高寒草原草甸 0—60 cm 土壤团聚体指标描述性统计见表 1。由表 1 可知,不同植被下团聚体稳定性指标存在一定差异,根据 Greminger 等^[23]和朱绪超等^[24]的分级标准,草原土壤团聚体稳定性指标中除 D 为弱变异,其余指标为中等变异;草甸土壤团聚体稳定性指标均为中等变异。

高寒草原草甸土壤团聚体稳定性指标沿土层深度变化见图 2。由图 2(a)、图 2(b)、图 2(c)可知,随着土层深度不断增加,草甸土壤团聚体稳定性指标 WSA、MWD、GMD 先增加后降低,且均在 10—20 cm 土层达到最大值;草原土壤团聚体稳定性指标 WSA、MWD、GMD 无明显增减趋势。草甸 40—60 cm 土层 WSA 与 0—30 cm 土层 WSA 存在显著差异 ($P<0.05$),草甸 30—60 cm 土层 MWD、GMD 与其余土层存在显著差异 ($P<0.05$);草原 10—20 cm 土层 MWD 与其余土层存在显著差异 ($P<0.05$),草原 10—20、30—40 cm 土层 GMD 与其余土层存在显著差异 ($P<0.05$);在 0—30 cm 土层 WSA、MWD 大小依次为草甸 $>$ 草原,而在 30—60 cm 土层 WSA、MWD 大小依次为草原 $>$ 草甸;在 0—40 cm 土层 GMD 大小为草甸 $>$ 草原,而在 40—60 cm 土层 GMD 大小为草原 $>$ 草甸。由图 2(d)可知,草甸 0—10 cm 土层 D 显著低于 10—60 cm 土层 ($P<0.05$),

2.1 土壤团聚体变化特征

2.1.1 土壤团聚体指标沿剖面深度变化特征 高寒草原草甸土壤各土层深度团聚体平均粒径分布见图 1。由图 1 可知,在高寒草原和高寒草甸各土层团聚体中,1~0.25 mm 粒径所占比例最大,占到总体团聚体的 40%~60%,平均为 52.48%; $>4\text{ mm}$ 粒径的土壤团聚体所占比例最小,为 1%~5%,平均为 2.32%;草原和草甸各土层不同粒径平均团聚体含量大小顺序相同,依次为:1~0.25 mm(52.48%) $>$ 0.25~0.038 mm(20.92%) $>$ 2~1 mm(12.86%) $>$ 4~2 mm(11.43%) $>$ 4 mm(2.32%)。由图 1 还可以看出,草甸土壤 $>4\text{ mm}$ 粒径团聚体含量随土层深度增加逐渐减少,0.25~0.038 mm 粒径团聚体含量随土层深度增加逐渐增多。

其中 40—50 cm 土层 D 为最大值,草原 40—50 cm 土层 D 显著低于其他土层 ($P<0.05$);相同土层深度除 40—50 cm 土层 D 为草甸 $>$ 草原,其余土层深度 D 为草原 $>$ 草甸。由图 2(e)可知,草原草甸 MWSA 随土层深度增加都先增加后降低,但变化不显著,并在 20—30 cm 达到最大值,在相同土层深度 MWSSA 均为草甸 $>$ 草原。由图 2(f)可知,草甸 PAD 随土层深度增加逐渐增加,草甸 0—10 cm 土层 PAD 显著低于其他土层 ($P<0.05$),草原 PAD 随土层深度增加无显著变化;0—40 cm 深度土层 PAD 均为草原 $>$ 草甸,40—60 cm 深度 PAD 均为草甸 $>$ 草原。由图 2 还可看出,部分相同土层下不同植被类型间团聚体指标存在显著差异。在 0—10 cm 土层,草原和草甸 D 差异显著 ($P<0.05$),在 10—20 cm 土层,草原和草甸 MWD、GMD 差异显著 ($P<0.05$),在 50—60 cm 土层,草原和草甸 WSA 差异显著 ($P<0.05$)。可知随着土层深度增加,草甸土壤团聚体稳定性逐渐降低,草原土壤团聚体稳定性无显著趋势。

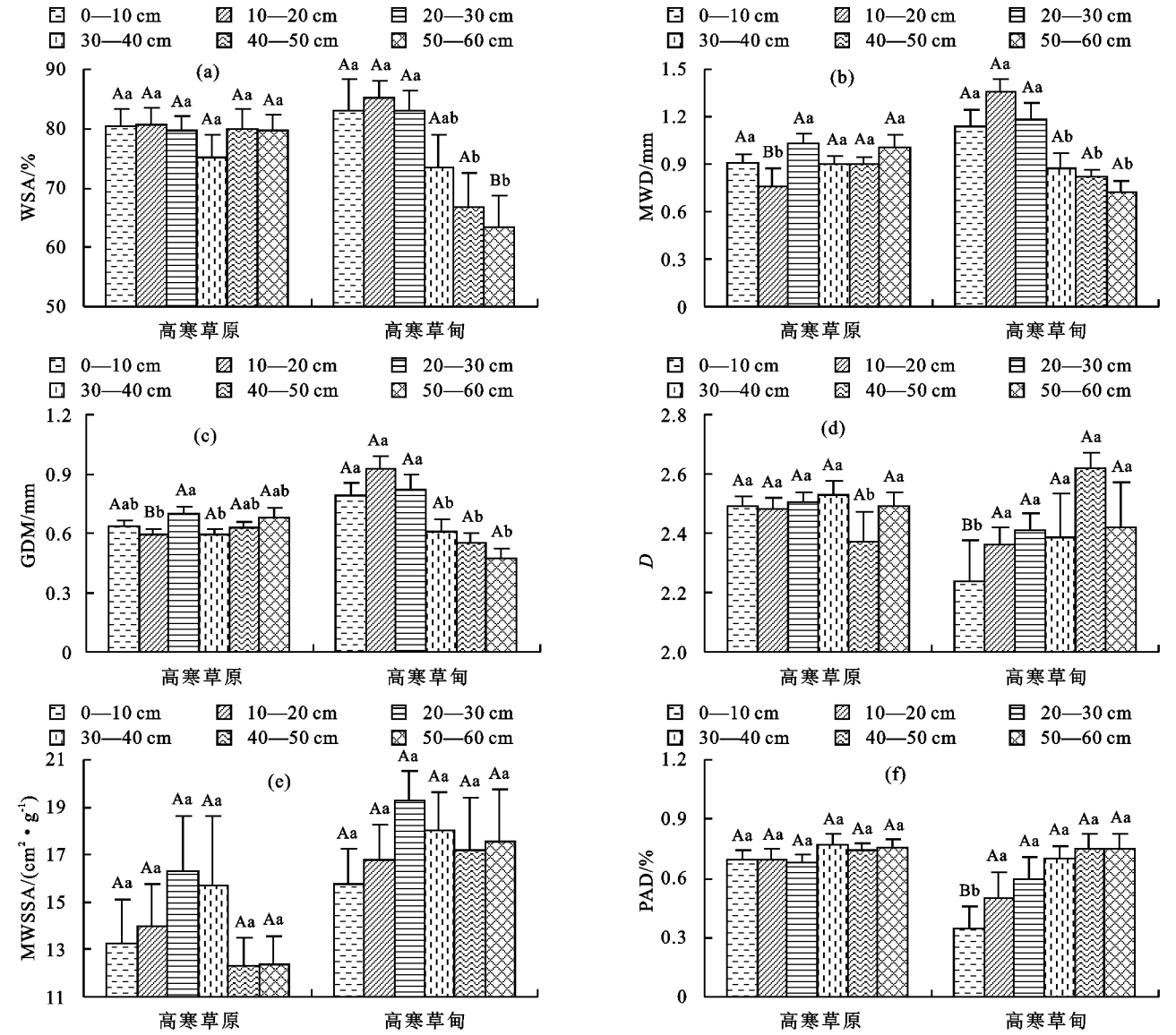
2.1.2 土壤团聚体指标随海拔变化特征 由图 3 可知,青藏高原高寒地带相同植被下 WSA、MWD、GMD 变化趋势相似, D 、MWSSA、PAD 变化趋势相似。草甸 WSA、MWD 和 GMD 随海拔升高先逐渐降低,当海拔增加到 4 800~5 000 m 时,WSA、MWD

和 GMD 随海拔升高开始逐渐增大,其中草甸 MWD 与海拔显著相关($R^2=0.546\ 8,P<0.01$),草甸 GMD 与海拔显著相关($R^2=0.554\ 5,P<0.01$);草甸 D 、MWSSA 和 PAD 随海拔升高先逐渐增大,在海拔升高到 4 800~5 000 m 时,草甸 D 、MWSSA 和 PAD 随海拔升高开始逐渐降低,其中草甸 PAD 与海拔显

著相关($R^2=0.877\ 4,P<0.01$)。草原 WSA、MWD 和 GMD 在海拔 4 200~5 300 m 随海拔增加逐渐减小, D 、MWSSA 和 PAD 在海拔 4 200~5 300 m 随海拔增加而逐渐增大,但其随海拔变化趋势并不显著。可知,随海拔增加,草甸土壤团聚体稳定性先降低后增大,草原土壤团聚体稳定性持续降低。

表 1 青藏高原高寒草原及草甸各土壤团聚体指标统计

植被类型	统计项目	WSA/%	MWD/mm	GMD/mm	D	MWSSA/(cm ² ·g ⁻¹)	PAD/%
草原	最小值	54.08	0.58	0.37	1.69	1.86	33.42
	最大值	95.51	1.65	1.14	2.74	37.24	96.55
	均值	80.30	0.98	0.67	2.47	13.77	71.87
	标准差	9.08	0.27	0.16	0.17	6.73	14.79
	变异系数	11.31	27.10	24.10	6.70	48.91	20.58
草甸	最小值	26.56	0.35	0.24	1.34	6.82	3.10
	最大值	95.72	1.77	1.27	2.90	27.78	98.29
	均值	77.30	1.07	0.73	2.41	16.46	60.58
	标准差	16.41	0.39	0.28	0.30	5.48	26.76
	变异系数	21.24	36.00	37.75	12.34	33.28	44.18



注:图中大写字母表示同一土层不同植被类型间显著差异($P<0.05$);小写字母表示同一植被类型下不同土层深度间显著差异($P<0.05$)。

图 2 青藏高原高寒草原草甸土壤 WSA、MWD、GMD、MWSSA、分形维数 D 和 PAD 沿土层深度分布变化

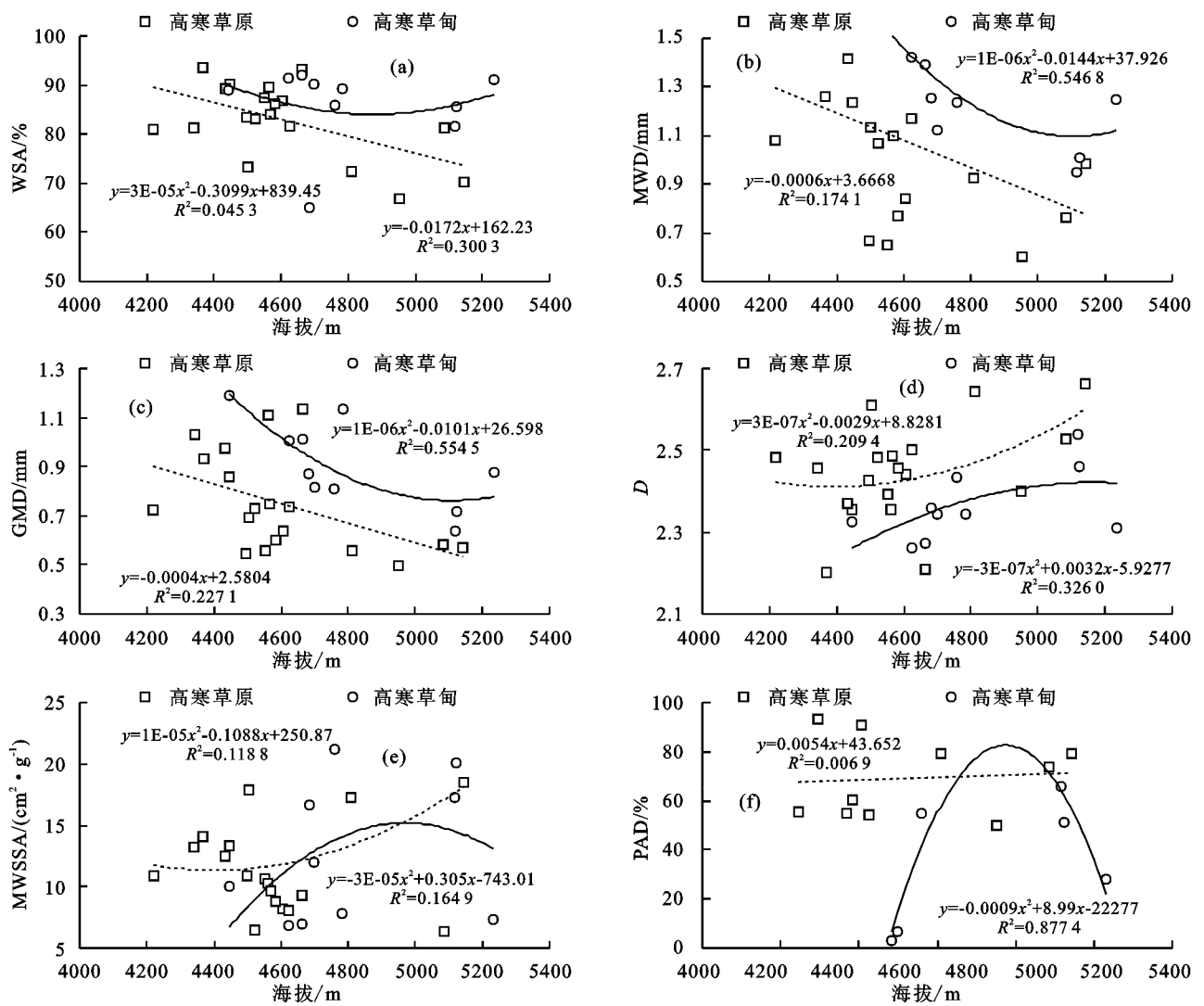


图 3 青藏高原高寒草原草甸土壤 WSA、MWD、GMD、MWSSA、分形维数 D 和 PAD 沿海拔变化趋势

2.2 高寒草原草甸土壤碳、氮、磷含量变化特征

2.2.1 土壤碳、氮、磷含量沿剖面深度变化特征 图 4 为青藏高原高寒草原草甸有机碳(soil organic carbon, SOC)、全氮(total nitrogen, TN)和全磷(total phosphorus, TP)沿深度变化图。由图 4 可知,随着土层深度不断增加,草甸土壤各养分含量逐渐降低,草甸 20—30, 30—40, 40—50, 50—60 cm 土层 SOC、TN 与 0—10, 10—20 cm 土层存在显著差异($P<0.05$),草甸 50—60 cm 土层 TP 与其余土层存在显著差异($P<0.05$)。草原 50—60 cm 土层 SOC 与其余土层存在显著差异($P<0.05$),而 TN、TP 随土层深度增加并无显著变化。在 0—60 cm 土层深度有机碳及全磷的含量均为草甸>草原,在 0—40 cm 土层深度全氮含量为草甸>草原,在 40—60 cm 土层深度全氮含量为草原>草甸。在 0—10, 10—20 cm 土层深度草原草甸有机碳含量存在显著差异($P<0.05$)。总体来说,青藏高原 SOC、TN、TP 草甸大于草原,草甸平均有机碳含量比草原高约 67%,全氮含量比草原高约 30%,全磷含量比草原高约 21%。

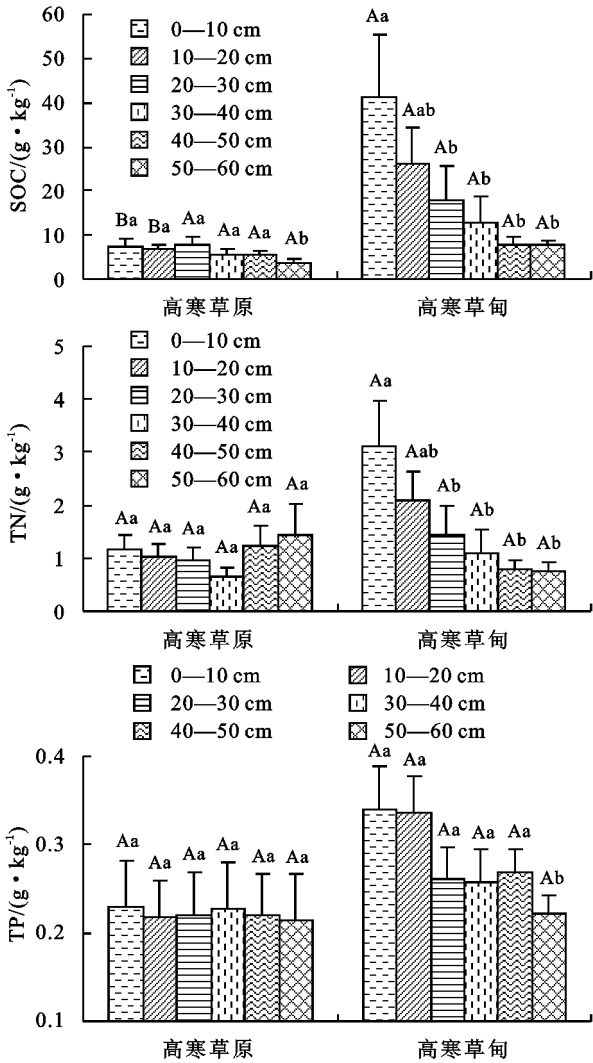
2.2.2 土壤碳、氮、磷含量随海拔变化特征 由图 5 可知,相同植被下 SOC、TN 及 TP 含量沿海拔梯度变化趋势一致。在海拔 4 200~5 000 m, 2 种植被各养分含量随海拔梯度均呈逐渐下降的趋势,在海拔 5 000~5 300 m, 草原各养分含量持续下降,而草甸植被各养分含量有所上升。其中草甸 SOC、TN、TP 含量与海拔均呈极显著相关($R^2=0.5827, P<0.01$; $R^2=0.6323, P<0.01$; $R^2=0.6381, P<0.01$)。由此可知,草甸土壤养分含量与海拔相关性较好,而草原土壤养分含量与海拔相关性较低。

2.3 高寒草原草甸土壤团聚体与养分相关分析

由表 2 和表 3 团聚体稳定性与粒径相关分析可知,草甸团聚体粒径与稳定性相关性较好,草原相关性次之。结合各团聚体参数性质可知,草原及草甸>4, 4~2, 2~1 mm 粒级团聚体与稳定性呈正相关, 1~0.25, 0.25~0.038 mm 粒级团聚体与稳定性呈负相关。

由表 2、表 3 草原草甸团聚体参数相关分析可知,草甸团聚体各稳定性指标相关性更好, WSA、MWD 及 GMD 互相为极显著正相关($P<0.01$),均

与 PAD 呈极显著负相关($P<0.01$),而 MWSSA、 D 与其他指标多呈显著相关($P<0.05$);草原团聚体稳定性指标相关性较好的为 WSA、GMD,其互相呈极显著正相关($P<0.01$),WSA 与 D 、MWSSA 呈极显著负相关($P<0.01$);GMD 与 MWD 呈极显著正相关($P<0.01$),与 MWSSA 呈极显著负相关($P<0.01$)。



注:图中大写字母表示同一土层不同植被类型间显著差异($P<0.05$);小写字母表示同一植被类型不同土层深度间显著差异($P<0.05$)。

图 4 青藏高原高寒草原草甸土壤 SOC、TN 及 TP 含量沿土层深度分布变化

表 2 青藏高原高寒草原土壤水稳性团聚体参数与粒级及养分的相关分析

草原	>4 mm	4~2 mm	2~1 mm	1~0.25 mm	0.25~0.038 mm	WSA	MWD	GMD	D	MWSSA	PAD
WSA	-0.200	-0.266*	0.096	0.607**	-0.895**	1					
MWD	0.567**	0.562**	0.475**	-0.533**	-0.084	0.101	1				
GMD	0.482**	0.426**	0.496**	-0.237	-0.495**	0.523**	0.838**	1			
D	-0.176	-0.032	0.058	-0.362**	0.625**	-0.346**	-0.076	-0.311*	1		
MWSSA	-0.178	-0.091	-0.170	-0.184	0.587**	-0.504**	-0.343*	-0.475**	0.345**	1	
PAD	0.418**	0.236	0.073	-0.173	-0.048	0.018	0.252	0.221	-0.010	-0.366**	1
SOC	0.357**	0.456**	0.083	-0.326*	0.081	-0.026	0.265	0.273*	0.116	0.184	0.120
TN	0.024	0.052	0.032	0.084	-0.212	0.257	0.091	0.222	-0.082	-0.012	-0.202
TP	0.095	0.280*	-0.071	-0.125	0.079	-0.012	0.192	0.139	0.133	0.134	-0.028

注: $n=55$; * 表示显著相关($P<0.05$, 双侧); ** 表示极显著相关($P<0.01$, 双侧)。

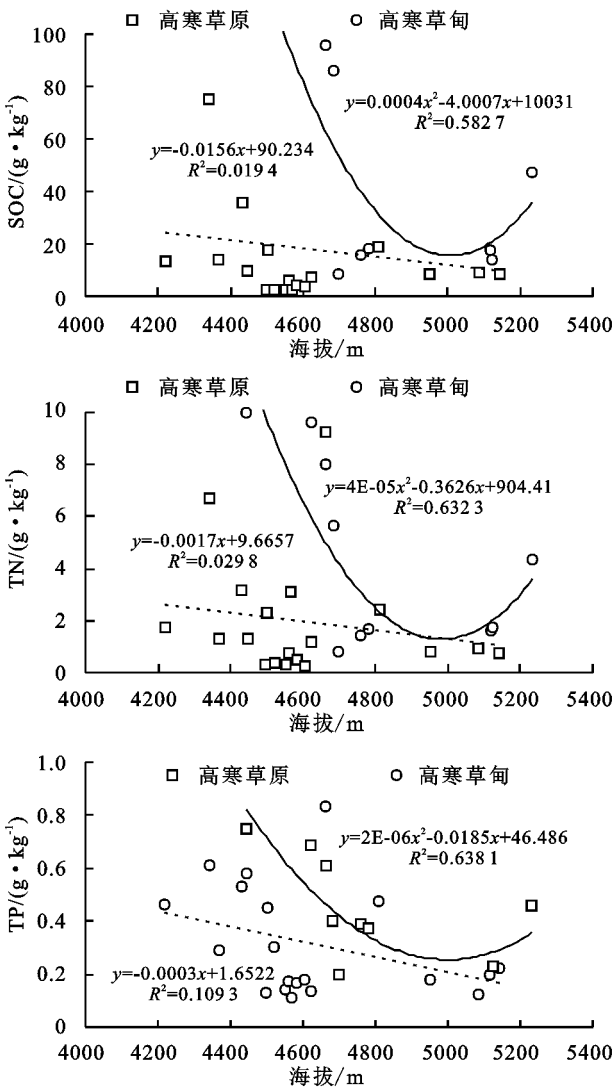


图 5 青藏高原高寒草原草甸土壤 SOC、TN 和 TP 沿海拔变化趋势

由表 2、表 3 草原草甸团聚体参数与养分相关分析可知,高寒草甸各养分与团聚体稳定性相关性较好,而草原各养分与土壤团聚体稳定性相关性较低。草甸养分含量均与 >4 mm 团聚体含量、GMD 极显著正相关($P<0.01$),与 PAD 极显著负相关($P<0.01$);有机碳、全氮含量与 2~1 mm 团聚体含量、MWD 极显著正相关($P<0.01$),与 0.25~0.038 mm 团聚体含量、 D 极显著负相关($P<0.01$)。草原有机碳含量与 >4 、4~2 mm 团聚体含量呈极显著正相关($P<0.01$)。

表 3 青藏高原高寒草甸土壤水稳性团聚体参数与粒级及养分的相关分析

草甸	>4 mm	4~2 mm	2~1 mm	1~0.25 mm	0.25~0.038 mm	WSA	MWD	GMD	D	MWSSA	PAD
WSA	0.167	0.616 **	0.693 **	0.322	-0.889 **	1					
MWD	0.472 **	0.893 **	0.798 **	-0.204	-0.803 **	0.808 **	1				
GMD	0.477 **	0.829 **	0.853 **	-0.129	-0.846 **	0.847 **	0.978 **	1			
D	-0.705 **	-0.232	-0.521 **	-0.074	0.579 **	-0.173	-0.351 *	-0.405 *	1		
MWSSA	-0.164	-0.179	-0.331 *	-0.341 *	0.511 **	-0.436 **	-0.329 *	-0.347 *	0.341 *	1	
PAD	-0.556 **	-0.468 **	-0.740 **	0.016	0.704 **	-0.609 **	-0.660 **	-0.727 **	0.516 **	0.186	1
SOC	0.808 **	0.276	0.554 **	-0.069	-0.546 **	0.350 *	0.531 **	0.564 **	-0.612 **	-0.287	-0.580 **
TN	0.744 **	0.266	0.526 **	-0.065	-0.515 **	0.352 *	0.515 **	0.548 **	-0.547 **	-0.286	-0.561 **
TP	0.429 **	0.207	0.360 *	-0.133	-0.286	0.261	0.400 *	0.433 **	-0.241	-0.224	-0.343 **

注: $n=36$; * 表示显著相关($P<0.05$, 双侧); ** 表示极显著相关($P<0.01$, 双侧)。

3 讨论

WSA 直接反映土壤团聚度,GMD 和 MWD 反映土壤粒径大小分布状况,其值越大,土壤稳定性越强。 D 、MWSSA 和 PAD 值越大,说明土壤中小粒级团聚体含量越多,团聚体破坏性越强,相应的稳定性变差。由图 2、图 3 可以看出,草甸 WSA、MWD、GMD 沿土层深度及海拔变化趋势一致,且均与 D 、MWSSA、PAD 变化趋势相反,因而各团聚体稳定性指标在一定程度上均能表征土壤团聚状态。由本文相关性分析可知,草甸 WSA、MWD、GMD、PAD 互相均呈极显著相关($P<0.01$),这与刘源跃^[20]、卢嘉等^[10]研究结果相似,表明这 4 个指标能较好地评价草甸土壤团聚体稳定性,而 MWSSA、 D 与其余指标多呈显著相关($P<0.05$),表明 MWSSA、 D 在本研究中评价草甸土壤团聚体稳定性结果较差。高寒草原团聚体稳定性指标相关性最好的为 WSA、GMD,因此,用 WSA、GMD 来评价研究区内草原土壤稳定性效果最好。

由结果分析可知,随土层深度增加,草甸 WSA、MWD、GMD 逐渐降低, D 、MWSSA、PAD 逐渐增大,因而草甸土壤团聚体稳定性随土深逐渐降低。根据 Hudek 等^[25]和宋日等^[19]的观点,植物的根部主要留存在表层土壤,其根系可分泌利于土壤团聚的物质,促进吸附细小土粒形成土壤结构,且根茎花叶等残体分解后生成腐殖质,有助于表层土壤有机质的累积,因此不同土层深度团聚体稳定性存在一定差异^[26],土层越深稳定性越差,这与周纯亮等^[13]的研究结果相似。在 0—30 cm 各土层土壤稳定性为高寒草甸>高寒草原,而在 30—60 cm 各土层高寒草原草甸土壤稳定性相差不大。这与图 4 不同植被各土层养分含量分布存在一定关联,在 0—30 cm 各土层有机碳、全氮及全磷的含量均为高寒草甸>高寒草原,而在 30—60 cm 各土层高寒草原与高寒草甸各养分含量相差不大,且各养分中有机碳差异最为显著。由图 3 及图 5 也可以看出,草原草甸土壤团聚体稳定性

与养分含量变化一致,并由表 3 可知,高寒草甸主要团聚体稳定性指标与各养分含量尤其是有机碳呈极显著相关($P<0.01$),因此草甸土壤团聚程度与土壤有机碳等养分含量紧密相关,且有机碳含量的提高有利于增强土壤结构的稳定性^[27],这与邢瑶丽等^[15]研究结果一致。

本研究中,草甸土壤团聚体稳定性随海拔升高先降低后增大,草原土壤团聚体稳定性随海拔升高持续降低,这与有机碳等养分含量随海拔变化趋势一致。土壤有机碳含量主要受有机碳的矿化积累以及植物覆盖等的影响。海拔也是影响土壤有机碳累积最重要的因素之一^[28],但海拔并不是直接改变土壤有机碳含量,而是通过改变温度、湿度以及微生物等来影响有机碳的矿化速度,从而间接影响有机碳含量^[29]。在本文研究区 4 200~5 000 m 范围内,草甸养分含量逐渐降低,这是由于在该海拔区间内植被盖度及物种多样性逐渐降低,植被残落物等腐殖化过程减弱,土壤有机碳输入量逐渐减少^[30],因而养分含量逐渐降低;在研究区 5 000~5 300 m 范围内,草甸养分含量逐渐升高,这是由于在该海拔区间内,海拔升高温度逐渐降低,微生物活性也逐渐降低,土壤呼吸作用变弱,有机碳矿化速率减缓,因而利于养分在土壤中的累积^[31]。草甸养分含量在海拔 5 000 m 左右达到最低值,根据王颖^[32]在青藏高原高寒草甸的相关研究表明,在 4 800~4 950 m 海拔地区土壤微生物碳源代谢强度最高,即有机碳含量最低,这也可证实本文观点。

土壤各粒级团聚体的组成不同会造成肥力及稳定性的差异^[15],通常认为大粒级团聚体是土壤中最好的结构体^[33]。由本文各粒径团聚体分布可知,草原和草甸土壤 1~0.25 mm 粒径团聚体所占比例最大,即研究区土壤均以 1~0.25 mm 团聚体为优势粒径。由粒径与团聚体相关分析可知,>4,4~2,2~1 mm 团聚体与土壤稳定性呈正相关,1~0.25,0.25~0.038 mm 团聚体与土壤稳定性呈负相关,从而认为土壤大团聚体含量越高,土壤稳定性越好,这与胡尧

等^[16]研究结果一致。随着土层深度增加,高寒草甸植被下土壤水稳性团聚体中大团聚体含量逐渐减少,微团聚体含量逐渐增多,即表层土壤稳定性大于深层土壤,与上文相符,进一步证实大团聚体可提高土壤结构的稳定性^[34]。由表 2、表 3 可知,草原土壤养分含量与 4~2,2~1 mm 团聚体显著相关,而草甸土壤养分含量与 >4,2~1 mm 团聚体显著相关,即 >4,4~2,2~1 mm 团聚体是影响土壤养分含量的主导因子,这与肖复明等^[14]的研究结果一致。

高寒草原与高寒草甸土壤团聚体稳定性及养分含量变化特征不同,这与土壤植物生长活动与根系分布密切相关。已有研究^[16]表明,不同的植被类型导致土壤养分含量不同,高寒草甸植被覆盖较多,生物量及有机物输入量较多,而草原地表植被稀疏,土壤积累腐殖质较少,养分含量低,因此草甸土壤养分含量及团聚体稳定性均大于草原。草甸团聚体稳定性及养分含量沿土层深度呈逐渐降低趋势,沿海拔升高呈先增大后减小趋势,而草原团聚体稳定性及养分含量沿土层深度无显著变化趋势,沿海拔逐渐下降,但拟合度不高。这可能与 6 月第 1 次草原样点采样有关,此时正处于植株生长初期,草原植被较难准确分辨,因而对研究结果存在一定影响。

4 结 论

(1)青藏高原高寒地区土壤团聚体稳定性为高寒草甸>高寒草原,且草甸土层深度越深团聚度越差($P<0.05$),而草原土壤稳定性沿土层深度无显著变化趋势。在海拔 4 200~5 000 m 处,青藏高原高寒土壤团聚体稳定性均随海拔升高逐渐降低,在海拔 5 000~5 300 m 处,草原土壤稳定性持续下降而草甸土壤稳定性有所上升。

(2)青藏高原高寒地区养分含量(SOC、TN、TP)均为高寒草甸>高寒草原,且草甸养分含量随土层深度增加呈显著下降趋势($P<0.05$),草原养分含量随土层深度无显著变化。高寒草甸养分含量随海拔升高呈先降低后增加趋势,并以海拔 5 000 m 为分界点,而高寒草原土壤养分含量随海拔升高呈逐渐降低趋势。

(3)>4,4~2,2~1 mm 粒级团聚体是影响土壤养分含量的主导因子,青藏高原高寒土壤团聚体稳定性主要受大团聚体主导作用;高寒草甸土壤团聚度与土壤养分含量呈极显著相关($P<0.01$),而高寒草原与养分含量无显著相关。

参考文献:

[1] Zhao Z L, Zhang Y L. Recent changes in wetlands on the Tibetan Plateau: A review[J].Journal of Geographical Sciences,2015,25(7):879-896.
[2] 赵恒策.青海省江河源区草地土壤可蚀性关键因子研究

[D].兰州:兰州大学,2019.
[3] 张亚丽.青藏高原东部农田土壤质量与土壤碳库研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.
[4] 卢金伟,李占斌.土壤团聚体研究进展[J].水土保持研究,2002,9(1):81-85.
[5] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993(20):1896-1899.
[6] Perfect E, Kay B D. Fractal theory applied to soil aggregation[J].Soil Science Society of America Journal,1991,55(6):1552-1558.
[7] 王婷,李建平,张翼,等.不同降水下天然草地土壤水稳定性团聚体分布特征[J].草业科学,2019,36(8):1935-1943.
[8] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J].Journal of Soil Science,1982,33(2):141-163.
[9] Castrignanò A, Stelluti M. Fractal geometry and geostatistics for describing the field variability of soil aggregation[J].Journal of Agricultural Engineering Research,1999,73(1):13-18.
[10] 卢嘉,郑粉莉,安娟,等.降雨侵蚀过程中黑土团聚体流失特征[J].生态学报,2016,36(8):2264-2273.
[11] 刘梦云,吴健利,刘丽雯,等.黄土台塬土地利用方式对土壤水稳性团聚体稳定性影响[J].自然资源学报,2016,31(9):1564-1576.
[12] 曹伟,李露,赵鹏志,等.坡地黑土碳氮分布及其与团聚体稳定性的关系[J].北京林业大学学报,2018,40(8):56-63.
[13] 周纯亮,吴明.中亚热带四种森林土壤团聚体及其有机碳分布特征[J].土壤,2011,43(3):406-410.
[14] 肖复明,范少辉,汪思龙,等.毛竹林地土壤团聚体稳定性及其对碳贮量影响研究[J].水土保持学报,2008,22(2):131-134.
[15] 邢瑶丽,赵志忠,李燕,等.不同土地利用方式土壤团聚体有机碳分布特征:以海南省定安县为例[J].广东农业科学,2018,45(10):74-81.
[16] 胡尧,李懿,侯雨乐.不同土地利用方式对岷江流域土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J].水土保持研究,2018,25(4):22-29.
[17] 王瑞永,刘莎莎,王成章,等.不同海拔高度高寒草地土壤理化指标分析[J].草地学报,2009,17(5):621-628.
[18] 曹舰艇,杨红,崔在忠,等.藏东南色季拉山东西坡不同海拔高度土壤养分含量分布特征[J].高原农业,2019,3(1):19-27.
[19] 宋日,吴春胜,郭继勋.东北草原植物残体腐解动态研究[J].草业学报,2002,11(2):105-108.
[20] 刘源跃.辽东山区三种林分土壤团聚体及其有机碳组分特征研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2018.
[21] 祁迎春,王益权,刘军,等.不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J].农业工程学报,2011,27(1):340-347.

- 壤磷的生物有效性及其影响因子分析[J].生态环境学报,2019,28(10):1999-2005.
- [10] Sarah A, Maarastawi A, Katharina Frindte, et al. Rice straw serves as additional carbon source for rhizosphere microorganisms and reduces root exudate consumption [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 135: 235-238.
- [11] Li Y Y, Yang R, Gao R, et al. Effects of long-term Phosphorus fertilization and straw incorporation on Phosphorus fractions in subtropical Paddy soil [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(2): 365-373.
- [12] 战厚强, 颜双双, 王家睿, 等. 水稻秸秆还田对土壤磷酸酶活性及速效磷含量的影响 [J]. *作物杂志*, 2015(2): 84-89.
- [13] Guan X K, Li W, Neil C, et al. Improved straw management practices promote in situ straw decomposition and nutrient release, and increase crop production [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 250(20): 119541.
- [14] Olof A, Kálmán R, Thomas K. Water and temperature dynamics in a clay soil under winter wheat: Influence on straw decomposition and N immobilization [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1993, 15(1): 1-8.
- [15] Shen J L, Tang H, Liu J Y, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar amendments on greenhouse gas emissions within double rice cropping systems [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 188: 264-274.
- [16] 汤宏, 沈健林, 张杨珠, 等. 秸秆还田与水分管理对稻田土壤微生物量碳、氮及溶解性有机碳、氮的影响 [J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 242-248.
- [17] 鲍士旦. 土壤农业化学分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [18] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用 [M]. 气象出版社, 2006: 54-95.
- [19] Zhang P, Chen X L, Wei T. Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 160: 65-72.
- [20] 田娟, 刘凌, 董贵明, 等. 淹水土壤磷释放机理研究进展 [J]. *土壤通报*, 2008, 39(2): 426-430.
- [21] 薄录吉, 王建国, 王岩, 等. 淹水时间对水稻土磷素形态转化及其有效性的影响 [J]. *土壤*, 2011, 43(6): 930-934.
- [22] Kraira Panond A, Jugsujinda A, Patrick W H. Phosphorus sorption characteristics in acid sulfate soils of Thailand: Effect of uncontrolled and controlled soil redox Potential (Eh) and pH [J]. *Plant and Soil*, 1993, 157(2): 227-237.
- [23] 王光火, 朱祖祥. pH 对土壤吸持磷酸根的影响及其原因 [J]. *土壤学报*, 1991, 28(1): 1-6.
- [24] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B C. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induce by cultivation practices and by laboratory incubation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46: 970-976.
- [25] 彭娜, 王凯荣, 王开峰, 等. 不同氮肥配施方法下稻草还田短期效应研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(4): 64-67.
- (上接第 308 页)
- [22] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses [J]. *Agronomy Journal*, 1936, 28(5): 337-351.
- [23] Greminger P J, Sud Y K, Nielsen D R. Spatial variability of field-measured soil-water characteristics [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49(5): 1075-1082.
- [24] 朱绪超, 邵明安, 朱军涛, 等. 高寒草甸生态系统表层土壤水分时间稳定性研究 [J]. *农业机械学报*, 2017, 48(8): 212-218.
- [25] Hudek C, Stanchi S, D'Amico, et al. Quantifying the contribution of the root system of alpine vegetation in the soil aggregate stability of moraine [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2017, 5(1): 36-42.
- [26] 于海艳, 宫汝宁, 周娅, 等. 北京八达岭地区 4 种人工林土壤团聚体稳定性及有机碳特征 [J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 162-166.
- [27] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展 [J]. *土壤学报*, 2004, 41(4): 618-623.
- [28] Tsui C C, Tsai C C, Chen Z S. Soil organic carbon stocks in relation to elevation gradients in volcanic ash soils of Taiwan [J]. *Geoderma*, 2013, 209/210: 119-127.
- [29] 杜有新, 吴从建, 周赛霞, 等. 庐山不同海拔森林土壤有机碳密度及分布特征 [J]. *应用生态学报*, 2011, 22(7): 1675-1681.
- [30] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 99-105.
- [31] 程浩, 张厚喜, 黄智军, 等. 武夷山不同海拔高度土壤有机碳含量变化特征 [J]. *森林与环境学报*, 2018, 38(2): 135-141.
- [32] 王颖. 青藏高原高寒草甸不同海拔土壤微生物功能多样性 [D]. 河北 邯郸: 河北工程大学, 2018.
- [33] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [34] 王兴, 祁剑英, 井震寰, 等. 长期保护性耕作对稻田土壤团聚体稳定性和碳氮含量的影响 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(24): 121-128.