

黄土高原小流域不同生态建设措施下土壤水稳性团聚体及其全氮分布特征

周世璇^{1,2}, 李 鹏^{1,2}, 张 祎^{1,2}, 马田田^{1,2}

(1.西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,西安 710048;

2.旱区生态水文与侵蚀灾害防治国家林业和草原局重点实验室,西安 710048)

摘要: 全氮(TN)作为土壤团聚体形成的胶结物质之一,能加速不同粒级团聚体之间的转化。以黄土高原王茂沟小流域为研究对象,采用“S”法及挖剖面法对坡耕地、草地、灌木地、林地及梯田 0—60 cm 土壤进行分层取样,以坡耕地为对照,探究 4 种生态建设下土壤团聚体稳定性及其 TN 含量,分析不同深度(0—20, 20—40, 40—60 cm)、不同粒级(>5, 5~2, 2~1, 1~0.5, 0.5~0.25, <0.25 mm)土壤团聚体 TN 贡献率。结果表明:生态建设显著提高了土壤大团聚体含量,其中草地、林地与坡耕地相比,表层土壤>5 mm 团聚体分别增加 469%和 438%,土壤团聚体稳定性(MWD、GMD)增加,在垂直方向上则表现为团聚体稳定性随土层深度增加而降低。较之坡耕地,草地、灌木地、林地及梯田可在不同程度上提高土壤团聚体 TN 含量,其中林地团聚体 TN 储量(36.53 kg/m²)最高,灌木地(32.12 kg/m²)、草地(20.30 kg/m²)及梯田(18.62 kg/m²)TN 储量较坡耕地分别增加 131%, 46%, 34%,随着土层深度增加,不同生态建设类型对团聚体 TN 含量的影响逐渐弱化。随着坡耕地—草地—灌木地—林地的自然演替过程,<0.25 mm 团聚体 TN 贡献率呈降低趋势,梯田能够在一定程度上改良坡耕地的土壤结构,粒径范围在 5~0.25 mm 的土壤团聚体 TN 含量近乎达到草地的恢复水平,但>5 mm 团聚体的恢复空间尚且较大。

关键词: 黄土高原; 生态建设; 土壤团聚体; 土壤 TN; 贡献率

中图分类号:S152.3; S153.6

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)03-0119-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.017

Distribution Characteristics of Soil Water-stable Aggregates and Total Nitrogen Under Different Ecological Construction Measures in a Small Watershed on the Loess Plateau

ZHOU Shixuan^{1,2}, LI Peng^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2}, MA Tiantian^{1,2}

(1.State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2.State Key Laboratory of National Forestry and

Grassland Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an 710048)

Abstract: Total nitrogen (TN), as one of the cementing substances formed by soil aggregates, can accelerate the transformation among aggregates with different particle sizes. Taking the Wangmaogou small watershed in the Loess Plateau as the research object, the “S” method and the digging section method were used to sample the 0—60 cm soil of slope farmland, grassland, shrubland, forest and terraces. The slope farmland was used as a control to explore the stability of soil aggregates and their TN content under four ecological constructions. The TN contribution rates of soil aggregates were analyzed for different depths (0—20, 20—40, 40—60 cm) and different particle sizes (> 5, 5~2, 2~1, 1~0.5, 0.5~0.25, < 0.25 mm). The results showed that ecological construction significantly increased the content of large soil aggregates. Compared with grassland and forest, the aggregates of > 5 mm in the surface soil were increased by 469% and 438% respectively, and the stability of soil aggregates (MWD, GMD) were increased. In the vertical direction, the stability of the aggregates decreased with the increasing depth. Compared with sloping farmland, grassland, shrubland, forest and terraces could increase the TN content of soil aggregates to varying degrees. Among

收稿日期:2020-10-29

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0402404);陕西省创新人才推进计划项目科技(水土资源环境演变与调控)创新团队(2018TD-037)

第一作者:周世璇(1997—),女,硕士研究生,主要从事水土保持与土壤有机碳研究。E-mail:zhoushixuan730@163.com

通信作者:李鹏(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:lipeng74@163.com

them, forest aggregates had the highest TN reserves (36.53 kg/m^2), and the TN reserves in the shrubland (32.12 kg/m^2), grassland (20.30 kg/m^2) and terraces (18.62 kg/m^2) were increased by 131%, 46% and 34% respectively compared with slope farmland. With the increase of soil depth, the influence of different ecological construction types on aggregate TN content gradually was weakened. With the natural succession process of sloping farmland-grassland-shrubland-forest, the contribution rate of TN by aggregates of $< 0.25 \text{ mm}$ showed a decreasing trend. Terraced fields could improve the soil structure of sloping farmland to a certain extent. With the particle size range of $5 \sim 0.25 \text{ mm}$, the TN content of soil aggregates could reach the level of grassland recovery, but the aggregates of $> 5 \text{ mm}$ had still relatively large space for recovery.

Keywords: Loess Plateau; ecological construction; soil aggregates; total soil nitrogen; contribution rate

黄土高原是目前世界上土壤侵蚀强烈、侵蚀危害严重的地区之一,坡面是侵蚀发生的基本单元,也是流域构成的基本单元^[1]。上个世纪 90 年代,在坡面上开展了大规模的生态建设(退耕还林草、坡改梯),可以有效减少侵蚀,增加土壤结构的稳定性,有助于养分的固存与累积。土壤结构是维持土壤功能的基础,土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,是土壤肥力的主要载体,对于维持土壤通透性具有重要作用^[2]。土层中团聚体的形成和分布与土壤中氮素的累积相互作用,密不可分^[3]。一方面在氮素的作用下,能够实现 $< 0.25 \text{ mm}$ 团聚体向稳定性更高的大团聚体转化,改变团聚体的组成及分布,增加土壤抗蚀性,改善原有土壤结构;另一方面,团聚体对土壤氮素的固存作用也不可忽视,粒径增加提高土壤稳定性,有效减少水土流失造成的养分流失,有助于氮素的保护与积累,改善土壤肥力^[4]。

不同土地利用方式下土壤团聚体的组成及其稳定性大小有所不同,其中自然恢复与人为种植活动相比能够更有效地改善土壤组成。在我国华北低丘山地土壤团聚体 MWD 表现出自然恢复林 $>$ 人工刺槐林 $>$ 农田^[5],王进等^[6]对喀斯特石漠化区林草恢复方式的研究也表明,自然恢复林/灌/草能显著提高大团聚体含量及团聚体稳定性。土地利用方式是影响小流域土壤氮素分布的主要环境因子,养分含量出现空间分异与地类有着密切的关系^[7-8]。王慧等^[9]研究指出,0—80 cm 土层范围内 TN 含量表现出乔木林地 $>$ 灌木林地 $>$ 草地 $>$ 农地 $>$ 撂荒地。相关研究^[10]表明,不同粒径团聚体对养分的蓄存作用也不同,其中 2~5 mm 团聚体是土壤有机质和 TN 的主要载体。前人^[5-10]对不同土地利用类型土壤团聚体分布及 TN 含量的研究主要为定量分析,忽视了不同粒径团聚体中 TN 储量对土壤 TN 含量的贡献程度不同。本文在探讨小流域坡面不同生态建设下土壤团聚体的组成分布、稳定性分析及其 TN 储量的基础上增加不同粒径团聚体中 TN 含量对土壤氮库的贡献率,并以此计算退耕后不同生态建设的恢复潜力,有助于揭

示不同生态建设下土壤团聚体稳定性及其 TN 分布特征,通过贡献率计算,阐明不同粒径土壤团聚体对于小流域 TN 的蓄存作用。

因此,本文选取黄土丘陵区进行生态建设的小流域的土地利用方式,通过研究坡耕地退耕恢复为草地、灌木及林地和进行坡改梯工程建设后,土壤团聚体的组成、稳定性、TN 的分布特征和对土壤 TN 的贡献,揭示生态建设下土壤团聚体由形成到稳定的过程及其对土壤 TN 固定的作用机制,以期合理评价不同退耕年限植被及坡改梯工程建设成效提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

王茂沟小流域介于东经 $110^{\circ}20'26''$ — $110^{\circ}22'46''$,北纬 $37^{\circ}34'13''$ — $37^{\circ}36'03''$,是陕西省榆林市绥德县无定河中游左岸的二级支沟(图 1)。流域面积 5.97 km^2 ,主沟长 3.75 km,平均比降 2.7%,沟道多,沟壑密度 4.3 km/km^2 ,流域海拔高度 940~1 188 m,土壤类型主要为黄绵土。气候为温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温 10.2°C ,水面蒸发量年均 1 519 mm,四季分明,年降水量分配不均,多年平均降水量 513 mm,多以暴雨形式出现在每年汛期(7—9 月),历时短,强度大,该时期降雨量占到全年降雨量的 73.1% 以上,造成严重的水土流失。王茂沟作为黄委会绥德水土保持科学实验站下设的黄土高原试验性治理的典型小流域,自 1952 年开始进行水土保持综合治理,截止 2013 年治理面积达 53.10 km^2 ,治理度高达 75.32%,阶段性成果显著。

1.2 样地选择与样品采集

该研究区内,坡耕地经过生态建设主要恢复成为油松林地(*Pinus tabulaeformis*)、白羊草草地(*Bothriochloa ischaemum*)、铁杆蒿(*Artemisia capillaris*)与茵陈蒿(*Caragana korshinskii*)灌木地,以及种植苹果(*Malus pumila*)及枣树(*Ziziphus jujube*)的经济林梯田,故选择这 5 种典型样地,样地情况见表 1。

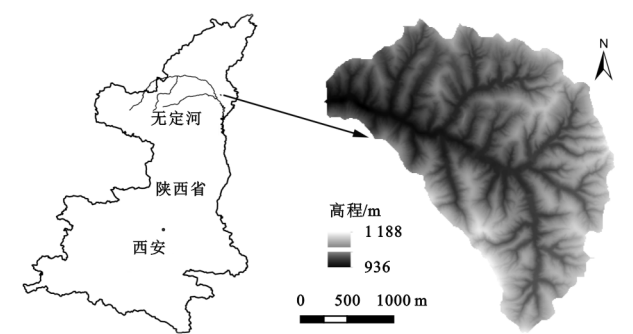


图 1 研究区示意

土壤样品采集于 2016 年 8 月,其中按照坡耕地和草地 1 m×1 m,灌木地 5 m×5 m,梯田 10 m×10 m,林地 20 m×20 m,选择 3 个地貌特征相似的样方,在样方内在根据“S”法进行取样,采用挖剖面法分层采集坡耕地、林地、草地、灌木地以及梯田 0—20,

20—40,40—60 cm 未扰动原状土样,将同一样方同一土层所采集的土壤混合用以消除空间异质性^[11],共 45 份,置于密封袋带回实验室。

1.3 指标测定

将土样自然风干,除去动植物残体以及肉眼可见植物根系和石块,采用先干筛后湿筛法分离水稳性土壤团聚体^[11]。具体操作为:称取 100 g 风干土样,纯水浸泡,将其放入装有 5 孔径为 5,2,1,0.5,0.25 mm 的套筛顶层,将套筛放入纯水环境中进行湿筛(振幅 3 cm,频率 50 次/min),取下 5 mm 的筛子,用少量纯水将各粒径团聚体分别无损转移到 100 mL 铝盒中,并置于 50 ℃ 烘箱中烘干至恒重,冷却后称重,得到>5,5~2,2~1,1~0.5,0.5~0.25,<0.25 mm 这 6 个粒径组分,并计算各个粒径组分的质量分数和 TN 含量。

表 1 采样地基本情况

样地类型	经度(E)	纬度(N)	海拔/m	坡度/(°)	坡向	植被特征
坡耕地	110°21′30.5″—110°21′31.4″	37°35′37.5″—37°35′38.5″	1066	38	半阴坡	人工种植高粱,种植制度为高粱—冬闲—高粱,存在翻耕行为,人为扰动大,无施肥
林地	110°20′52.2″—110°20′53.2″	37°35′32.8″—37°35′33.9″	985	25	半阴坡	人工种植,林高 6 m 以上,主要树种为油松,种植年限 30 年以上,无人为扰动
草地	110°21′21.9″—110°21′23.4″	37°35′23.4″—37°35′23.5″	966	30	半阴坡	人工种植,草本覆盖度 90% 以上,主要草种为白羊草,种植年限 30 年以上,无人为扰动
灌木地	110°21′42.5″—110°21′43.7″	37°35′14.4″—37°35′15.2″	1030	12	半阴坡	灌层高度约 1 m,主要植被为铁杆蒿+茵陈蒿,种植年限 20 年以上,无人为扰动
梯田	37°35′39.5″—37°35′40.6″	37°35′39.5″—37°35′40.6″	1036	4	半阴坡	种植苹果+枣树,种植年限 30 年以上,使用商量喷雾化肥,存在少量人为扰动

TN 测定采用 Foss KjelTec 8400 全自动凯式定氮仪进行测定。取研磨并过 100 目筛土样 1.000 g,加入 1.86 g 催化剂和 5 mL 浓硫酸高温消煮 2 h,再进行上机测定。土壤容重采用环刀法^[11]进行测定。

1.4 数据处理

水稳性团聚体 TN 贮量计算公式^[13]为:

$$TN_{\text{贮}} = TN_{\text{团}} \times W_{\text{团}} \times P \times H \tag{1}$$

式中: $TN_{\text{贮}}$ 为水稳性团聚体 TN 贮量(kg/m²); $TN_{\text{团}}$ 为水稳性土壤团聚体 TN 含量(g/kg); $W_{\text{团}}$ 水稳性团聚体质量分数(%); P 为土壤容重(g/cm³); H 为土层厚度(m)。

团聚体质量分数计算公式^[12]为:

$$W_{\text{团}} = M_{\text{团}} / M_{\text{土}} \times 100\% \tag{2}$$

式中: $M_{\text{团}}$ 为团聚体质量(g); $M_{\text{土}}$ 为土壤质量(g)。

平均重量直径(MGD,mm)^[6]和几何平均直径(GMD,mm)^[12]可以用作表征土壤团聚体稳定性,其值越大,说明团聚体结构稳定性越高。平均重量直径(MGD)和几何平均直径(GMD)计算公式为:

$$MWD = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (W_i X_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \right) \tag{3}$$

$$GMD = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right) \tag{4}$$

式中: n 为粒径分组的组分; X_i 为对应粒径组分的平均直径(mm); W_i 为对应粒径水稳性团聚体的质量分数(%)。

不同粒径团聚体中 TN 对土壤 TN 的贡献率计算公式为:

$$R_N = \frac{100 (AN_i \cdot W_i)}{TN} \tag{5}$$

式中: R_N 为贡献率(%); AN_i 为某粒级团聚体 TN 含量(g/kg); W_i 为该粒级团聚体所占百分比(%); TN 为该层土壤全氮的含量(g/kg)。

试验所得数据及表格采用 Excel 2016 软件进行处理,利用 SPSS 21.0 软件进行统计分析,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)比较不同水稳性团聚体粒径间的差异显著性(数据服从正态分布且各组间方差不存在齐性),作图采用 Origin 2016 软件。

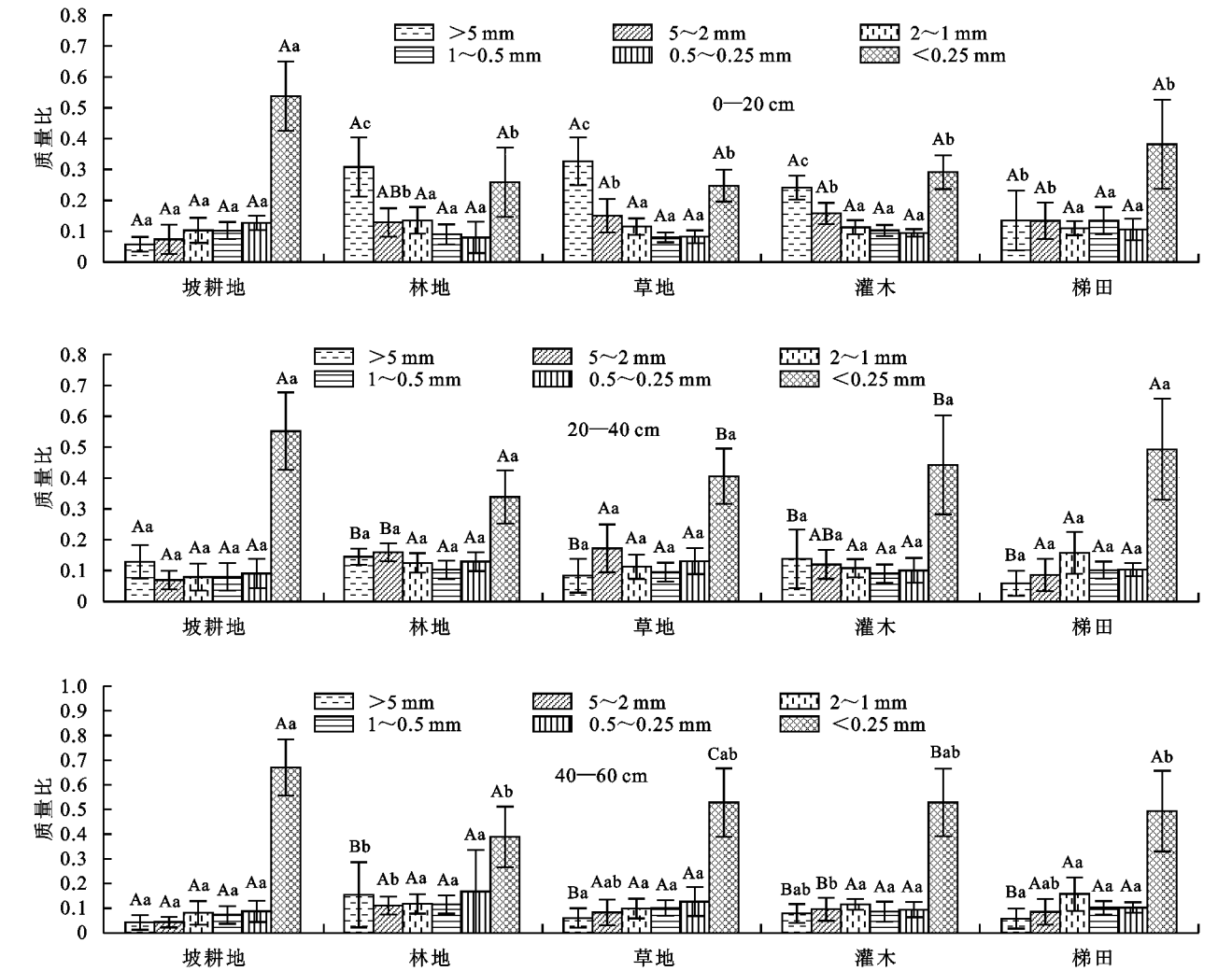
2 结果与分析

2.1 不同生态建设下土壤团聚体分布特征

不同生态建设及土层深度下土壤水稳性团聚体含量见图 2。在 0—20 cm 土层范围内,不同生态建

设下 >5 mm 团聚体组成比例表现为草地(31%) $>$ 林地(29%) $>$ 灌木(23%) $>$ 梯田(13%) $>$ 坡耕地(5%),与坡耕地相比,草地、林地、灌木地、梯田分别增加 469%,438%,321%,135%($P<0.05$)。林地、草地、灌木、梯田 <0.25 mm 团聚体与坡耕地相比,分别降低了 52%,54%,46%,29%,达到显著性差异水平($P<0.05$)。在 40—60 cm 土层深度内, >5 mm 土壤团聚体除坡耕地与林地之间存在显著差异($P<0.05$),林地较坡耕地 >5 mm 团聚体含量增加了 263%,其他生态建设类型与坡耕地相比有增加趋势,但未表现显著($P>0.05$)。林地、灌木地土壤 5~2 mm 团聚体含量较坡耕地显著增加($P<0.05$)。林地、梯田 <0.25 mm 水稳性土壤团聚体分别降低 42%,26%($P<0.05$)。

从土壤剖面来看,除了坡耕地外,不同土层深度对林地、草地、灌木地、梯田不同粒径团聚体组成存在一定影响,且该影响主要集中在粒径为 >5 ,5~2, <0.25 mm 的水稳性团聚体。其中,林地、草地、灌木地以及梯田 >5 mm 水稳性团聚体在 0—20 cm 土层均表现出良好的团聚作用($P<0.05$);林地 5~2 mm 团聚体在 20—40 cm 土层显著增加($P<0.05$),该现象在灌木地中则出现在 40—60 cm 土层内($P<0.05$);草地 <0.25 mm 团聚体含量在剖面上组成为 40—60 cm(45%) $>$ 20—40 cm(34%) $>$ 0—20 cm(21%),较 0—20 cm 土层,20—40,40—60 cm 土层 <0.25 mm 团聚体含量分别增加了 64%,114%($P<0.05$)。灌木地 <0.25 mm 团聚体含量随土层深度增加表现出显著增加($P<0.05$)。



注:图柱上方不同小写字母表示同一土层深度不同生态建设下差异达到显著性水平($P<0.05$);不同大写字母表示同一生态建设不同土层深度下差异达到显著性水平($P<0.05$)。下同。

图 2 不同生态建设土壤各粒径团聚体质量比

不同生态建设类型 0—60 cm 土层各粒径团聚体组成见图 3。数据表明,不同土地利用类型下土壤团聚体的组成也有所差异。微团聚体(<0.25 mm)是土壤结构的颗粒单位,能够有效反映出土壤的团聚性。

<0.25 mm 土壤团聚体是 5 种地类团聚体的主要组成成分,占比为 34%~55%,超过土层中不同粒径团聚体的平均占比。随着坡耕地转变为灌木、草地、林地以及坡改梯有效减少了 0—60 cm 土层内 <0.25 mm 团聚

体占比,与坡耕地相比,<0.25 mm 团聚体分别降低了 20%,26%,39%,11%,说明有效的生态建设使微团聚体往大团聚体转化,土壤结构稳定性增加。

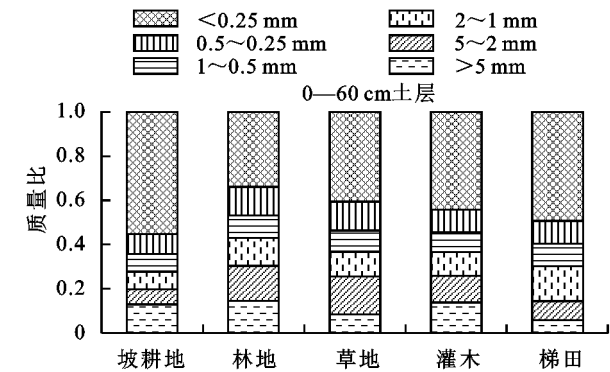


图 3 不同生态建设各粒径团聚体质量比平均值

2.2 不同生态建设下土壤团聚体稳定性差异特征

平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)是

反映土壤团聚体稳定性的重要指标。不同生态建设下水稳性团聚体 MWD 和 GMD 值见表 2。0—20 cm 土层深度内,林地、草地、灌木地和梯田水稳性团聚体 MWD 和 GMD 值均显著性高于坡耕地($P<0.05$)。20—40 cm 土层,林地、草地、灌木地、梯田 MWD 和 GMD 值较坡耕地均存在不同程度的增加,但并未表现出显著性差异($P<0.05$)。在 40—60 cm 土层深度内,不同生态建设类型团聚体 MWD 值差异性主要体现在林地和草地与坡耕地之间($P<0.05$),除林地外,草地、灌木地和梯田团聚体 GMD 值与坡耕地相比均未有显著性差异($P>0.05$)。随着植被演替年限的增加,林地、草地、灌木以及梯田与坡耕地相比,水稳性团聚体 MWD 和 GMD 值都表现出增长趋势,表明随着坡耕地转化为林地、草地、灌木地以及梯田,土壤稳定性提高,抗水蚀能力加强。

表 2 不同生态建设下 MWD 和 GMD 值 单位:mm

生态建设	MWD			GMD		
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
坡耕地	1.03±0.37Aa	1.44±1.27Aa	0.75±0.33Aa	0.38±0.15Aa	0.57±0.55Aa	0.27±0.10Aa
林地	3.16±0.85Ac	2.00±0.29Ba	1.92±1.05Bb	1.33±0.48Ac	0.75±0.19Aa	0.77±0.65Ab
草地	3.27±0.53Ac	1.57±0.59Ba	1.09±0.55Bb	1.36±0.34Ac	0.64±0.39Ba	0.41±0.17Bab
灌木	2.68±0.28Ac	1.78±0.82Ba	1.27±0.40Ba	1.02±0.20Abc	0.66±0.40Ba	0.44±0.16Bab
梯田	1.83±0.86Ab	1.15±0.48Ba	1.05±0.24Ba	0.72±0.34Ab	0.47±0.23Ba	0.40±0.08Bab

注:表中同列不同小写字母表示同一土层深度不同生态建设下差异达到显著性水平($P<0.05$);同列不同大写字母表示同一生态建设不同土层深度下差异达到显著性水平($P<0.05$)。

2.3 不同生态建设下团聚体全氮分布

图 4 为不同土地利用类型及土层深度下土壤各粒径 TN 含量。由图 4 可知,不同生态建设类型表层土壤(0—20 cm),除梯田外,林地、灌木地及草地不同粒径团聚体 TN 含量较坡耕地均表现出显著增加($P<0.05$)。在 20—40 cm 土层深度内,林地、草地、灌木地及梯田>5,2~1 mm 团聚体 TN 含量较坡耕地相比有降低趋势,但未表现显著($P>0.05$)。林地、灌木地 1~0.5,0.5~0.25,<0.25 mm 团聚体 TN 含量显著高于坡耕($P<0.05$)。40—60 cm 土层内,林地除>5 mm 团聚体外,其余粒径团聚体 TN 含量与坡耕地相比,差异达到了显著水平($P<0.05$)。随着土层深度的增加,土地利用类型对团聚体 TN 含量的影响逐渐降低,5 种土地利用类型 0—20 cm 土层各粒径 TN 含量均高于 20—40,40—60 cm 土层 TN 含量。说明坡耕地通过生态建设成林地、草地、灌木地和以及坡改梯工程建设有助于表层(0—20 cm)土壤团聚体 TN 的恢复和蓄存。

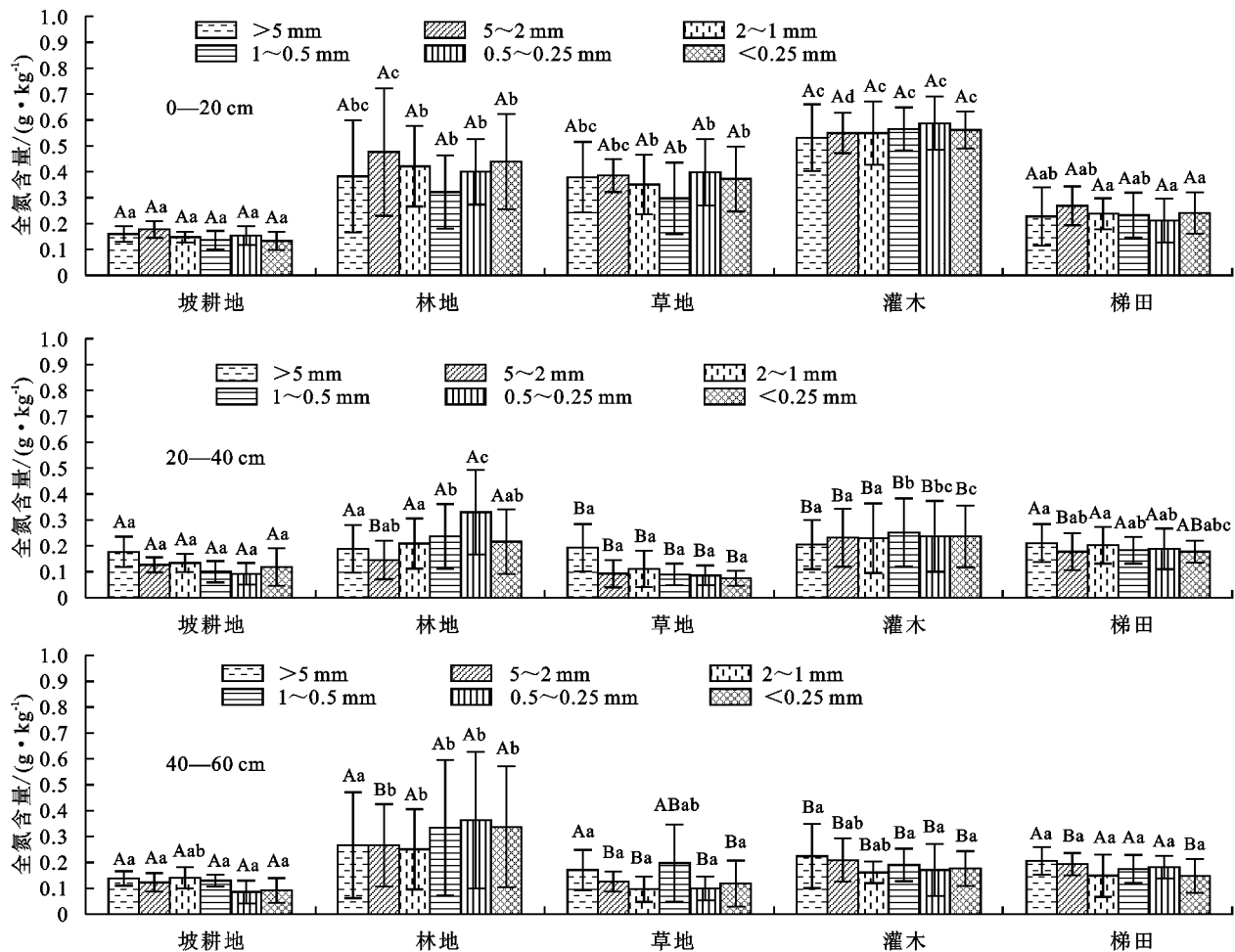
2.4 不同生态建设下土壤团聚体全氮贡献率

团聚体对土壤氮素的保存及供应能力因粒径不同而异^[14]。由图 5 可知,不同土层生态建设类型、不同土层深度水稳性团聚体对土壤氮贡献率不同,整体表现

为<0.25 mm 团聚体对土壤 TN 贡献率占主导地位,并随着土层深度的增加,<0.25 mm 团聚体的主导作用更为明显,但植被演替能够有效地消除这种影响。坡耕地作为植被演替初期的形态,不同土层<0.25 mm 团聚体对土壤 TN 的贡献率均达 50%以上,并且随着垂向深度增加,其余粒径团聚体贡献率相应减小。草地表层土壤(0—20 cm)>5 mm 团聚体贡献率最高,沿着纵剖面向下,微团聚体(<0.25 mm)逐渐占据主导地位。不同土层深度下,灌木地表现出<0.25 mm 团聚体对 TN 的蓄存呈增加趋势,而其余 5 种粒径团聚体则随土层深度增加而降低。林地各粒径团聚体对土壤 TN 的贡献率随着土层深度的增加表现出与灌木同样的趋势,但团聚体贡献率变幅明显小于灌木,说明林地作为演替的最终形态,各粒径团聚体之间的转化逐渐稳定。梯田除>5 mm 团聚体表现出随土层深度增加,贡献率降低的趋势外,其余粒径团聚体均表现为波动趋势。

该研究以林地作为演替的最终形式,利用>0.25 mm 团聚体 TN 贡献率分析 0—60 cm 土层深度内不同植被演替阶段的恢复潜力,计算结果见表 3。5 种粒径恢复潜力均表现出林地>灌木>草地>坡耕地,符合植被演替的正常规律。梯田作为黄土高原治理水土流失的工程措施,>5 mm 团聚体的恢复潜力与

坡耕地一致,但是 5~0.25 mm 范围的 4 个粒径团聚体的恢复潜力与草地相似。



注:图柱上方不同小写字母表示同一土层深度不同生态建设下差异达到显著性水平($P<0.05$);不同大写字母表示同一生态建设不同土层深度下差异达到显著性水平($P<0.05$)。

图 4 不同土生态建设及土层深度下土壤各粒径 TN 含量

2.5 不同生态建设下土壤全氮储量

坡耕地经过退耕还林(草)及坡改梯工程建设后,不同土地利用方式下土壤团聚体中 TN 储量出现不同程度的增加。由图 6 可知,在 0—60 cm 土层深度内,不同生态建设下团聚体 TN 储量表现为林地(36.53 kg/m²)>灌木(32.12 kg/m²)>草地(20.30 kg/m²)>梯田(18.62 kg/m²)>坡耕地(13.91 kg/m²),其中林地和灌木地团聚体 TN 储量与坡耕地相比表现出了显著性差异($P<0.05$),而草地和梯田仅表现出增加趋势($P>0.05$)。说明不同生态建设对团聚体 TN 的固存作用不同,其中林地和灌木地作为植被演替的较高级形式,有助于土壤团聚体 TN 的积累和保护。

3 讨论

3.1 植被演替过程中土壤团聚体稳定性

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其组成与分布特征影响土壤养分的蓄存,土地利用方式的改变对团聚体含量、不同粒径团聚体数量分布等也存在重要影响^[15]。本研究中,对各个粒径含量进行比较,<0.25 mm 团聚体含量在不同土地利用类型的含量最高,说

明<0.25 mm 团聚体在土壤结构中占主导地位,随着植被演替过程的进行,不同土地利用方式下<0.25 mm 团聚体含量呈现坡耕地>梯田>灌木>草地>林地,说明植被演替有助于微团聚体(<0.25 mm)向大团聚体(>0.25 mm)转化。相比于 0—20 cm 土层坡耕地,退耕还林的林地、草地、灌木地以及坡改梯工程建设,各粒径含量间的差异性减小,表明植被恢复及坡改梯能够有效改善表层土壤结构。Tisdall 等^[16]研究表明,人为扰动优先破坏大团聚体,进而形成粒径更小的团聚体。随着坡耕地转林地、草地、灌木地和梯田,人为耕作活动减少,降低对原表层土壤团聚体的破坏,增强对土壤结构的保护。也有研究^[17]表明,团聚体碳氮固存存在协同作用,土壤中 95% 的 TN 以有机态存在,对于团聚体的形成具有较大的影响^[3]。林地、草地、灌木地以及梯田中各粒径 TN 储量显著高于坡耕地,通过有机质的胶结作用,土壤中的微团聚体(<0.25 mm)依次向粒径更大的团聚体转化,从而提升土壤结构稳定性。

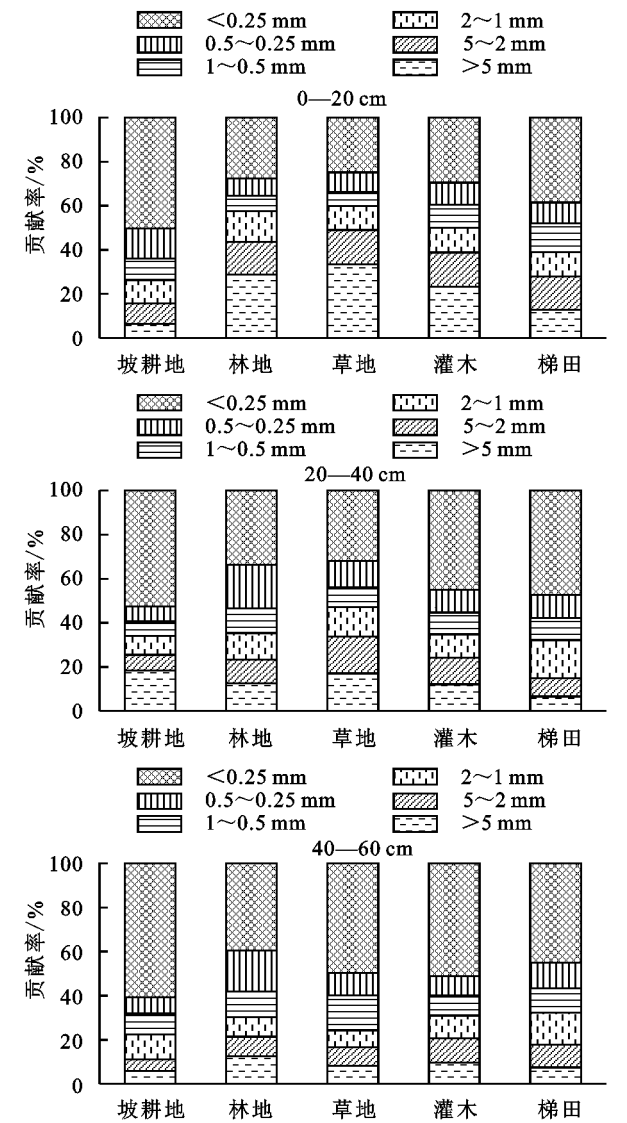
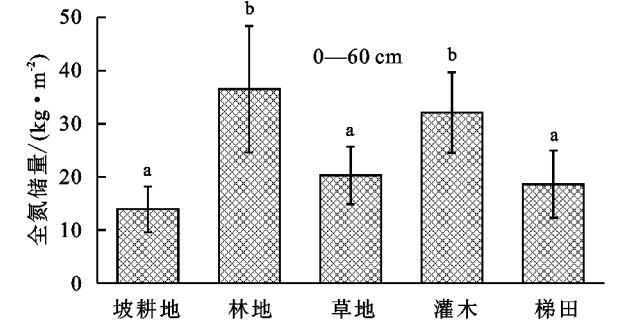


图5 各级水稳性团聚体对土壤氮的贡献率占比

生态建设	>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm
坡耕地	6	4	6	5	5
林地	27	19	18	15	22
草地	12	9	10	9	11
灌木	15	13	17	15	15
梯田	6	7	13	11	10



注:图柱上方不同小写字母表示不同生态建设团聚体 TN 储量差异达到显著性水平($P<0.05$)。

图6 不同生态建设土壤各粒径团聚体 TN 储量

坡耕地经过植被恢复以及坡改梯工程建设,土壤

有机质含量增加,导致大团聚体含量增加。水稳性团聚体是土粒通过各种自然作用形成的抗水力分散的结构单位^[18],其稳定性在一定程度上反映了土壤结构的稳定性,是评价土壤抗蚀能力及判断土壤是否发生退化的重要指标^[19],平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)是反映土壤团聚体稳定性的重要指标,MWD 和 GMD 值越大,表明水稳性团聚体粒径团聚度越高,稳定性越强。0—20 cm 土层深度内,草地、林地、灌木地和梯田土壤团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)均显著高于坡耕地。退耕地在植被恢复过程中通过根系物理缠绕的外力作用,以及提高植物碎屑及分泌物输入的胶结作用,促进土壤团聚体的形成进,而改善土壤结构,提升土壤质量。数据表明,林地、草地以及灌木在该土层土壤团聚体稳定性显著高于梯田,但在 20—40 cm 土层各土地利用类型团聚体稳定性差异不显著,这是因为林地、草地、灌木地地表存在大量的枯落物,补充了微生物活动所需能量,大大促进微生物的对枯落物的分解,产生可供土壤团聚体形成的胶结物质,加快小粒径团聚体向稳定性更高的团聚体转化^[20]。梯田属于黄土高原生态建设的工程措施,主要种植果树、枣树等经济作物,种植年限较短且地表生物量远低于林地、草地、灌木地,地表枯落物较少,植物通过枯落物的分解将养分回归土壤这一环节强度远低于林地、草地、灌木地,再加上不发达的根系程度,导致团聚体形成的胶结物质量降低,进而影响土层中大团聚体含量,土壤稳定性随之降低。

3.2 植被演替不同阶段土壤团聚体内全氮差异分析

本研究中,除坡耕地外 4 种土地利用类型 TN 含量表现出随土层深度增加而减小的趋势。考虑到土壤—植物之间存在相互反馈的作用机制^[21],土壤的养分条件会影响植物的生长发育,而植物通过根系及枯落物将养分回归土壤。动植物残体堆积在土壤表层,补充微生物活动所需能量,极大地促进微生物的对枯落物的分解,补充团聚体形成的胶结物质。较之林地、草地、灌木地以及梯田,坡耕地加剧了对土层的扰动,既破坏了大团聚体,导致土壤团聚体的重新分布,加快团聚体周转速率,还影响土壤自身调节作用和恢复,破坏土体的稳定性和连续性。

结合数据分析,林地、草地和灌木地在表层(0—20 cm)TN 含量显著高于坡耕地,出现养分聚表特征,除了枯落物因素外,地表植被覆盖对养分的保护不容忽视。植被冠层对降雨的截留作用能够有效降低雨滴对地表的击溅,同时枯落物通过增加地表粗糙

度,减缓径流速度,进而降低坡面土壤流失,也意味着蓄存在团聚体内的养分得到了有效的保护。坡面土壤养分含量增加促进稳定性更高的大团聚体的形成,进一步增加了土壤的抗蚀能力,形成良性循环。林地、草地以及灌木地由于人为扰动较少,加之地表枯落物及根系对土壤养分的输入,TN 含量与梯田相比表现出极显著差异。梯田主要种植经济作物,存在人为扰动因素,其次果实收获减少了土壤 TN 的来源,不利于土壤 TN 的积累与保护。较之坡耕地,梯田坡度较为平缓,有利于降低径流流速,减少径流对坡面的冲刷,对土壤表层养分的累积具有一定作用。

本研究表明,土壤团聚体 TN 储量随着植被恢复年限的增加而升高,这与区晓琳等^[22]和郑子成等^[23]的研究结果一致。由于植物凋落物是土壤 TN 输入的主要方式^[24],因此,随着植被恢复年限的延长,地表的枯枝落叶层厚度增加,并作为氮库持续向土壤输入 TN,再加土壤团聚体稳定性的相应提高,使 TN 可以得到有效的蓄存。

3.3 植被演替不同阶段恢复潜力分析

已有研究^[25]表明,土壤大团聚体($>5\text{ mm}$)对氮库的储备功能更强,随着植被演替过程的横向进行,大团聚体含量逐渐增加,其对土壤 TN 的贡献率也呈上升趋势。各粒径团聚体 TN 贡献率在土层纵向上也表现出随土层深度的增加,贡献率降低的趋势,这与团聚体在时间横向、空间纵向上含量的分布特征相似,表明团聚体含量是引起团聚体养分贡献率变化的主导因素。以林地作为演替的最高级形式,5 种粒径恢复潜力表现出林地 $>$ 灌木 $>$ 草地 $>$ 坡耕地,符合植被演替的正常规律。 $0.25\sim 0.5\text{ mm}$ 土壤团聚体贡献率较其他中小粒径相比,贡献率稍大,这可能是因为团聚体间的转化是逐级进行,在有机质的胶结下,较多 $<0.25\text{ mm}$ 团聚体向粒径更高一级的 $0.25\sim 0.5\text{ mm}$ 转化。梯田是 $>5\text{ mm}$ 团聚体的恢复潜力与坡耕地一致,但是 $5\sim 0.25\text{ mm}$ 范围的 4 个粒径团聚体的恢复潜力与草地相似,表明作为黄土高原水土保持的工程措施,与自然演替过程相比,人为修建梯田能够在短期之内达到草地的修复水平,但是由于梯田存在一定人为扰动的影响, $>5\text{ mm}$ 团聚体破碎化程度较高,加之地表胶结物质较少,导致该粒径团聚体与草地、灌木地相比,恢复空间尚且较大。

4 结论

(1)生态建设及土层深度对不同粒级土壤团聚体的分布及稳定性有显著影响。退耕后林地、灌木地、草地和梯田 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量均高于坡耕地,随

着土层深度增加,团聚体稳定性降低。

(2)生态建设对土壤团聚体 TN 的影响主要体现在 $0\sim 20\text{ cm}$ 的表层土壤,随着土层深度的增加,不同生态建设类型对团聚体 TN 含量的影响逐渐降低。

(3)团聚体的 TN 贡献率符合坡耕地—草地—灌木地—林地的自然演替规律,梯田能够在一定程度上改良坡耕地的土壤结构,粒径范围在 $5\sim 0.25\text{ mm}$ 的土壤团聚体 TN 含量能够达到草地的恢复水平,但 $>5\text{ mm}$ 团聚体的恢复空间尚且较大。

参考文献:

- [1] 陈浩.黄土高原退耕还林前后流域土壤侵蚀时空变化及驱动因素研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [2] Zhang Y, Li P, Liu X J, et al. Effects of farmland conversion on the stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in soil aggregates on the Loess Plateau of China [J].*Geoderma*,2019,351:188-196.
- [3] 魏朝富.土壤有机无机复合体的研究进展[J].*地球科学进展*,2013,18(2):221-227.
- [4] Plaza C, Courtier-Murias D, Fernández J M, et al. Physical, chemical, and biochemical mechanisms of soil organic matter stabilization under conservation tillage systems: A central role for microbes and microbial by-products in C sequestration [J].*Soil Biology and Biochemistry*,2013,57:124-134.
- [5] 任荣秀,杜章留,孙义亨,等.华北低丘山地不同土地利用方式下土壤团聚体及其有机碳分布特征[J].*生态学报*,2020,40(19):6991-6999.
- [6] 王进,刘子琦,鲍恩侯,等.喀斯特石漠化区林草恢复对土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J].*水土保持学报*,2019,33(6):249-256.
- [7] 孙骞,王兵,周怀平,等.黄土丘陵区小流域土壤碳氮磷生态化学计量特征的空间变异性[J].*生态学杂志*,2020,39(3):766-774.
- [8] 王艳玲,蒋发辉,徐江兵,等.长期配施有机肥对旱地红壤微团聚体中有机碳含量的影响[J].*土壤通报*,2018,49(2):377-384.
- [9] 王慧,郭月峰,姚云峰,等.不同土地利用方式下土壤碳氮磷化学计量特征[J].*西南农业学报*,2020,33(5):995-1000.
- [10] 张钦,张爱华,姚单君,等.连续种植不同绿肥作物的耕层土壤团聚体中氮分布及其固持特征[J].*土壤通报*,2019,50(3):577-584.
- [11] 赵雨森,王克勤,辛颖.水土保持与荒漠化防治实验教程[M].北京:中国林业出版社,2013.
- [12] 张伟,时鹏,李鹏,等.小流域生态建设对土壤团聚体及其有机碳影响研究[J].*应用基础与工程科学学报*,2019,27(1):50-61.

2016,32(19):154-161.

- [16] 史东梅,蒋光毅,彭旭东,等.不同土石比的工程堆积体边坡径流侵蚀过程[J].农业工程学报,2015,31(17):152-161.
- [17] 张佳瑞,王金满,祝宇成,等.分形理论在土壤学应用中的研究进展[J].土壤通报,2017,48(1):221-228.
- [18] 蔡新民,丁新新,潘健,等.分形理论在土壤科学研究中的应用[J].防护林科技,2011(6):8-13.
- [19] 刘继龙,马孝义,付强,等.陕西杨凌土壤粒径分布体积分形维数特征分析及预测[J].灌溉排水学报,2012,31(3):59-62.

(上接第 126 页)

- [13] Eynard A, Schumacher T E, Lindstrom M J, et al. Effects of agricultural management systems on soil organic carbon in aggregates of Ustolls and Usterts[J]. Soil and Tillage Research,2004,81(2):253-263.
- [14] Adnan M, Xu M G, Syed A A S, et al. Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of southern China [J].Journal of Environmental Management,2020,270:e110894.
- [15] 张会慧,王世标,王均睿,等.三江平原湿地不同利用方式对土壤理化性质及团聚体组成的影响[J].生态学报,2019,38(6):1679-1687.
- [16] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water - stable aggregates in soils [J].European Journal of Soil science,1982,33(2):141-163.
- [17] 武均,蔡立群,齐鹏,等.不同耕作措施下旱作农田土壤团聚体中有机碳和全氮分布特征[J].中国生态农业学报,2015,23(3):276-284.
- [18] 徐香茹,汪景宽.土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展[J].土壤通报,2017,48(6):1523-1529.
- [19] Tang F K, Cui M, Lu Q, et al. Effects of vegetation restoration on the aggregate stability and distribution

- [20] 赵暄,谢永生,景民晓,等.生产建设项目弃土堆置体下垫面仿真模拟标准化参数[J].水土保持学报,2012,26(5):229-234.
- [21] 王国梁,周生路,赵其国.土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J].土壤学报,2005,42(4):545-550.
- [22] 李君兰,蔡强国,孙莉英,等.降雨强度、坡度及坡长对细沟侵蚀的交互效应分析[J].中国水土保持科学,2011,9(6):8-13.
- [23] 张媛静,张平仓,丁文峰.黄土与紫色土坡面侵蚀特征对比试验研究[J].水土保持通报,2010,30(4):60-62.

of aggregate-associated organic carbon in a typical karst gorge region [J].Solid Earth,2016,7(3):2213-2242.

- [20] 白秀梅,韩有志,郭汉清.庞泉沟自然保护区典型森林土壤大团聚体特征[J].生态学报,2014,34(7):1654-1662.
- [21] Ahmad E H, Demisie W, Zhang M. Effects of land use on concentrations and chemical forms of phosphorus in different-size aggregates [J].Eurasian Soil Science,2017,50(12):1435-1443.
- [22] 区晓琳,陈志彪,陈志强,等.亚热带侵蚀红壤区植被恢复过程中土壤团聚体化学计量特征[J].土壤学报,2018,55(5):1156-1167.
- [23] 郑子成,何淑勤,王永东,等.不同土地利用方式下土壤团聚体中养分的分布特征[J].水土保持学报,2010,24(3):170-174.
- [24] 朱秋莲,邢肖毅,张宏,等.黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J].生态学报,2013,33(15):4674-4682.
- [25] 杜臻杰,樊向阳,吴海卿,等.施用生物质炭和猪场沼液对潮土团聚体及氮素形态影响研究[J].灌溉排水学报,2015,34(9):20-23,27.