

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.030.

王俊, 肖华翠, 盛浩, 等. 湘西北土壤物理健康对土地利用转换的响应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 336-343.

Wang Jun, Xiao Huacui, Sheng Hao, et al. Response of Soil Physical Health to Land Use Change in Northwest Hunan Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 336-343.

湘西北土壤物理健康对土地利用转换的响应

王俊¹, 肖华翠¹, 盛浩¹, 周萍²

(1. 湖南农业大学 资源学院, 长沙 410128;

2. 中国科学院 亚热带农业生态研究所 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125)

摘要: [目的] 揭示原始林转换为其他土地利用方式对土壤物理健康的影响, 以为中亚热带山区土地资源合理开发利用提供科学依据。[方法] 选取湘西北典型原始林及其转换而来的人工林、园地、坡耕地和水田表土作为研究对象, 通过野外调查采样和室内分析, 研究了主要土壤物理特性对原始林转换的响应规律。[结果] (1) 原始林转换为园地、耕地, 土壤砂粒含量增加, 颗粒组成呈粗骨化趋势。原始林转换为果园、坡耕地, 表土明显压实, 容重和紧实度分别增加 24%~28% 和 27%~76% ($p<0.05$)。 (2) 与原始林相比, 果园、坡耕地和水田土壤最大持水量、毛管持水量和田间持水量分别降低 15%~30%, 15%~32% 和 13%~21%; 土壤大团聚体含量、平均重量直径、几何平均直径和团聚体稳定性指数也分别降低 34%~59%, 27%~52%, 36%~73% 和 49%~61%, 分形维数增加 31%~80% ($p<0.05$), 小团聚体、微团聚体和粉-黏颗粒含量也呈增加趋势。[结论] 原始林转换导致土壤持水能力下降、结构劣化和物理健康退化。原始林转换为杉木人工林, 土壤物理指标响应敏感性一般低于原始林转为园地、耕地, 相对有利于保持水土和维持土壤物理健康。土壤团聚体稳定性指数响应敏感、测试简单且成本低, 推荐应用于土壤健康评价。

关键词: 土地利用方式; 土壤物理性质; 土壤持水性能; 团聚体稳定性

中图分类号: S718.55; S152

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0336-08

Response of Soil Physical Health to Land Use Change in Northwest Hunan Province

Wang Jun¹, Xiao Huacui¹, Sheng Hao¹, Zhou Ping²

(1. College of Resources, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to reveal the effects of conversion of primary forest to other land use on soil physical health, and to provide scientific basis for rational development and utilization of land resources in the central subtropical mountain region. [Methods] The top soils in typical primary forests and converted plantations, orchards, sloping tillage, and paddies in northwest Hunan Province were selected. The response of major soil physical properties to the primary forest conversion was studied. [Results] (1) Following the primary forest conversion to orchard and sloping tillage, the content of sand in soil increased, the soil particle composition showed coarsening trend, and the bulk density and compactness increased by 24%~28% and 27%~76%, respectively, leading to significant topsoil compaction ($p<0.05$). (2) Compared to the primary forest, the soil maximum water holding capacity, capillary water holding capacity, and field water holding capacity reduced by 15%~30%, 15%~32% and 13%~21%, respectively, in orchard, sloping cropland, and paddy. And the content of macroaggregate, mean weight diameter, geometric mean diameter, and aggregate stability

收稿日期: 2024-01-22

修回日期: 2024-02-12

资助项目: 湖南省重点研发计划项目(2023NK2026); 国家自然科学基金(41571234); 科技基础资源调查专项课题(2021FY100504)

第一作者: 王俊(2000—), 男, 湖南岳阳人, 在读硕士生, 研究方向为土地转换与土壤健康。E-mail: 18182032815@139.com

通信作者: 盛浩(1982—), 男, 湖南长沙人, 博士, 教授, 主要从事土壤资源利用与环境研究。E-mail: shenghao82@hunau.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

index decreased by 34%~59%, 27%~52%, 36%~73% and 49%~61%, respectively, whereas the fractal dimension increased by 31%~80% ($p<0.05$), and the contents of small aggregate, microaggregate, and silt-clay particle tended to increase. [Conclusion] The primary forest conversion resulted in the reduction of water-holding capacity, structural deterioration, and physical health degradation in soil. The response ratios of soil physical properties were lower for the primary forest conversion to plantation than for the primary forest conversion to orchard and sloping cropland. The capacity of soil and water conservation and soil physical health maintenance were higher in plantation than in orchard and sloping cropland. The soil aggregate stability index was sensitive, simply processed, and low-cost, and was recommended for soil health evaluation.

Keywords: land use type; soil physical properties; soil water holding capacity; aggregate stability

快速土地覆被转换与集约化土地利用渐变已导致生物多样性锐减、景观同质化和生态系统服务功能下降^[1]。近40年来,随着国民经济持续高速增长,高强度土地利用、转换和高度集约化农林业管理,一些土壤性质、功能和健康质量呈下降趋势。培育健康土壤关联“全球健康(One Health)”和实现可持续发展目标,已成为政府、科学界和社会公众关注焦点。

自然成土环境、土地利用和农业管理措施是调控土壤健康的主要因子,但是准确测定土壤健康,仍极具挑战^[2]。已有量化土壤健康的方法/工具中,主要指标是土壤化学和生物学指标,土壤物理指标相对较少,已涉及质地、团聚体稳定性、有效水、紧实度、结构和土层厚度^[3-4]。优化筛选敏感、有效、廉价且应用广的土壤物理健康指标,对于创新土壤健康评价工具/方法具有重要价值。尽管土地利用方式转换显著影响一系列土壤物理性质(例如:孔隙性、结构性和持水能力)^[5-6],但是不同土壤物理指标对土地转换响应的敏感度依赖特定的自然立地条件(气候、母质类型、微地形和植被覆盖)和多样化的人为管理措施^[7-8]。因此,仍有必要针对特定区域、特定土地利用方式,明确土壤物理性质对土地转换的响应规律。

本课题组此前已系统报道土壤微生物组成与网络^[9]、活性碳组分与酶活性^[10-11]、团聚体碳组分^[7]和土壤养分^[12]对原始林转换的响应规律。然而,有关土壤物理性质对原始林转换响应规律,仍缺乏系统研究。因此,本研究选取中亚热带丘陵区同一流域毗邻分布、本底一致且土地利用史清晰的原始常绿阔叶林以及由此转变而来的人工林地、园地和耕地,分析测试表土孔隙性、结构性和持水性能,目的在于明确土壤物理性质对土地转换的响应规律,以期为准评价土壤物理健康和区域土地资源合理利用与科学调整提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地的地理位置、自然环境条件和农林业管理

措施同 Xiao^[9]和肖华翠^[10]等。此处简述如下:试验地位于湘西小溪国家级自然保护区(110°6′—110°21′E, 28°42′—28°53′N),低山、丘陵,中亚热带湿润季风气候。分布大面积低海拔带的原始常绿阔叶林,被誉为“世界少有、中国独有、中南13省唯一幸存的免遭第四纪冰川侵袭的低海拔常绿阔叶原始次生林”。在中国土壤分类系统中,原始林发育地带性土壤主要为板岩风化物发育的红壤(土类)、泥质红壤(土属)、厚腐厚土泥质红壤(土种)。

在小溪镇的泉溪、田溶和小溪3个自然村,分别选取1个小流域。在各小流域内,选取原始林(对照)以及毗邻的由原始林转换而来的杉木人工林、果园、坡耕地和水田,组成1个原始林转换的序列。原始林成片分布且完整、人为干扰活动很少,优势种为中亚热带常绿阔叶树种。杉木人工林是由原始林经皆伐、整地和炼山后,人工种植形成,幼年人工林有轻度人工管理,包括人工抚育和清除林下灌丛。果园、坡耕地和水田经“坡改梯”技术建成,果园种植猕猴桃或柑橘,坡耕地为坡上种植一季玉米,水田种植一季稻。果园和耕地采用当地传统习惯管理,包括耕作、施肥、旱季灌溉和除草。猕猴桃园施用有机肥和化肥,年施用量分别为42 t/hm², 840 kg/hm²。玉米地和水田施用化肥, N, P₂O₅和K₂O年施用量分别为135, 26, 96 kg/hm²。

1.2 土壤样品采集与测试

试验于2023年4月19—23日,在各小流域不同土地利用方式内,随机选取9~15个表层样品采样点,应用不锈钢土钻,采集0—20 cm表土混合样品;应用不锈钢铝盒,采集土壤团聚体样品;应用环刀,采集原状土样品。新鲜土壤混合样品经自然风干,去除植物根系和残体,研磨过10目孔径的尼龙筛,同时收集和称量土壤中>2 mm粒径的砾石重量。

应用紧实度仪(TJSD-750-II, 托普云农科技有限公司, 中国)原位测定土壤紧实度。根据国际制土壤颗粒分级标准,采用沉降法,测定土壤颗粒组成,划分土壤质地类型;采用环刀法,测定容重。采用环刀浸泡法,

测定最大持水量、毛管持水量和田间持水量^[13-14]。应用湿筛法,筛分出大团聚体(>2 mm)、小团聚体(2~0.25 mm)、微团聚体(0.25~0.053 mm)和粉黏粒级团聚体(<0.053 mm),计算土壤团聚体稳定性指标^[15]。应用智能手机图像识别软件 SLAKES,测定土壤团聚体稳定性指数(STAB₁₀)^[16]。

1.3 数据分析

基于 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 20 软件平台,计算土壤各指标的描述统计量(平均值和标准差);应用单因素方差分析,结合最小显著差异法(LSD),对不同土地利用方式土壤物理指标进行均值比较,显著性水平设为 0.05。应用 Origin 2021 软件作图,图表中数据为平均值±标准差。应用平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、>0.25 mm 水稳性团聚体含量($R_{0.25}$)和分形维数(D)衡量土壤团聚体的稳定性,计算公式如下:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i \bar{d}_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \tag{1}$$

$$GMD = \exp[\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \ln \bar{d}_i)}{\sum_{i=1}^n w_i}] \tag{2}$$

$$R_{0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T} \tag{3}$$

$$\frac{M_{r<\bar{d}_i}}{M_T} = (\frac{\bar{d}_i}{d_{max}})^{3-D} \tag{4}$$

式中: w_i 为第*i*级团聚体质量; \bar{d}_i 为第*i*级团聚体平均直径; $M_{r>0.25\text{ mm}}$ 为粒径大于 0.25 mm 团聚体质量; M_T 为团聚体总质量; $M_{r<\bar{d}_i}$ 为粒径小于第*i*级团聚体平均直径; d_{max} 为团聚体最大粒径。

应用响应比(RR)值来指示土壤物理指标对原始林转换响应的敏感性,其值的正负、大小分别指示响应的方向与敏感程度^[11]。计算公式如下:

$$RR = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_1} \times 100\% \tag{5}$$

式中: Q_1 为原始林土壤物理指标; Q_2 为其他土地利用方式土壤物理指标。

2 结果与分析

2.1 土壤颗粒组成、容重和紧实度

土壤质地属于壤土类,包括黏壤土、壤土(表 1)。尽管不同土地利用方式土壤砂粒、粉粒和黏粒平均含量无显著差异,但是原始林转为园地、耕地,土壤砂粒、粉粒平均含量分别呈升高、降低趋势。与原始林相比,水田土壤砾石百分比大幅降低 84%($p<0.05$)。

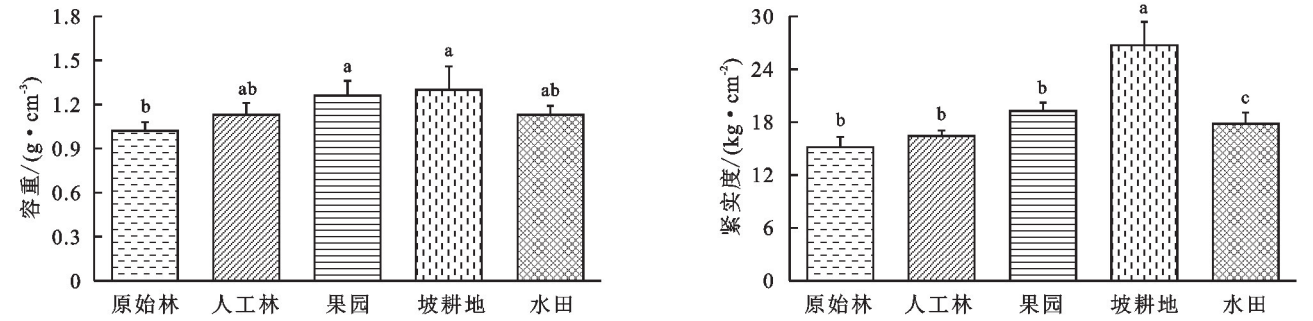
表 1 不同土地利用方式土壤颗粒组成

Table 1 Soil particle composition under various land uses					%
土地利用方式	砾石 (>2 mm)	砂粒 (2~0.05 mm)	粉粒 (0.05~0.002 mm)	黏粒 (<0.002 mm)	质地类型
原始林	38±8a	33±8a	39±6a	28±9a	黏壤土
人工林	36±10a	35±10a	39±8a	26±7a	壤土
果园	31±6a	45±7a	32±8a	23±6a	壤土
坡耕地	46±3a	39±2a	33±3a	29±3a	黏壤土
水田	6±4b	42±7a	33±9a	25±2a	壤土

注:同一列不同小写字母表示不同土地利用方式之间差异显著($p<0.05$),下同。

从图 1 可以看出,土壤容重和紧实度分别介于 1.0~1.5 g/cm³, 13.9~28.8 kg/cm²。与原始林相比,果园和坡耕地土壤容重分别提高 24%和 28%,紧

实度分别提高 27%和 76%($p<0.05$)。未观察到原始林、人工林和水田土壤容重、紧实度有显著差异($p>0.05$)。



注:不同小写字母表示不同土地利用方式之间差异显著($p<0.05$),下同。

图 1 不同土地利用方式土壤容重和紧实度

Fig. 1 Soil bulk density and compaction under various land uses

2.2 土壤持水能力

与原始林相比,转换后土地利用方式土壤的最大持水量、毛管持水量和田间持水量呈下降趋势(图2)。特别是,果园和坡耕地土壤最大持水量平均值比原始林低出15%~30%($p<0.05$)。未观察到原始林、人工林和水田土壤最大持水量有显著差异。原始林转换为人工林、果园和坡耕地,土壤毛管持水量平均值分别降低15%,32%和18%;原始林转换为果园,土壤田间持水量平均值降低21%。原始林和水田土壤毛管持水量、田间持水量均无显著差异($p>0.05$)。

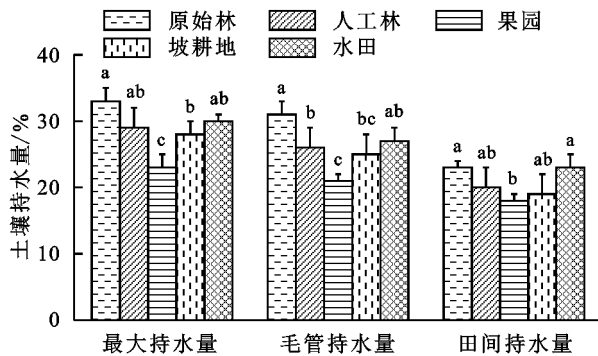


图2 不同土地利用方式土壤持水能力

Fig. 2 Soil water holding capacity under various land uses

2.3 土壤团聚体组成和稳定性

土壤团聚体组成以 >0.25 mm大团聚体为主,占土壤团聚体总质量的66%~84%(表2)。原始林转换为园地、耕地,土壤大团聚体平均含量呈下降趋势。特别是,与原始林相比,水田土壤大团聚体平均含量降低64%($p<0.05$)。然而,原始林转换为其他土地利用方式,土壤小团聚体、微团聚体和粉-黏颗粒平均含量呈升高趋势。与原始林相比,果园、坡耕地和水田土壤大团聚体平均含量显著增加34%~59%,水田粉-黏颗粒的平均含量显著增加127%。

表2 不同土地利用方式土壤团聚体组成

Table 2 Soil aggregate composition under different land uses

土地利用方式	%			
	大团聚体 (>2 mm)	小团聚体 ($2\sim0.25$ mm)	微团聚体 ($0.25\sim0.053$ mm)	粉-黏颗粒 (<0.053 mm)
原始林	55±9a	29±5b	6±5a	11±4b
人工林	59±7a	24±3b	5±3a	13±6b
果园	35±4b	44±3a	8±3a	13±5b
坡耕地	34±4b	43±7a	8±1a	14±7b
水田	20±7b	46±9a	9±4a	25±5a

土地转换显著影响土壤团聚体稳定性(图3)。与原始林相比,果园、坡耕地和水田土壤团聚体MWD值降低27%~52%,GWD值和 $R_{0.25}$ 也呈降低趋势;特别是,水田GMD和 $R_{0.25}$ 分别显著降低73%和22%($p<0.05$)。与原始林相比,果园、坡耕地和

水田的D值分别显著增加53%,31%和80%。原始林转换为人工林、果园、坡耕地和水田,土壤团聚体稳定性指数分别显著降低48%,61%,52%和49%。

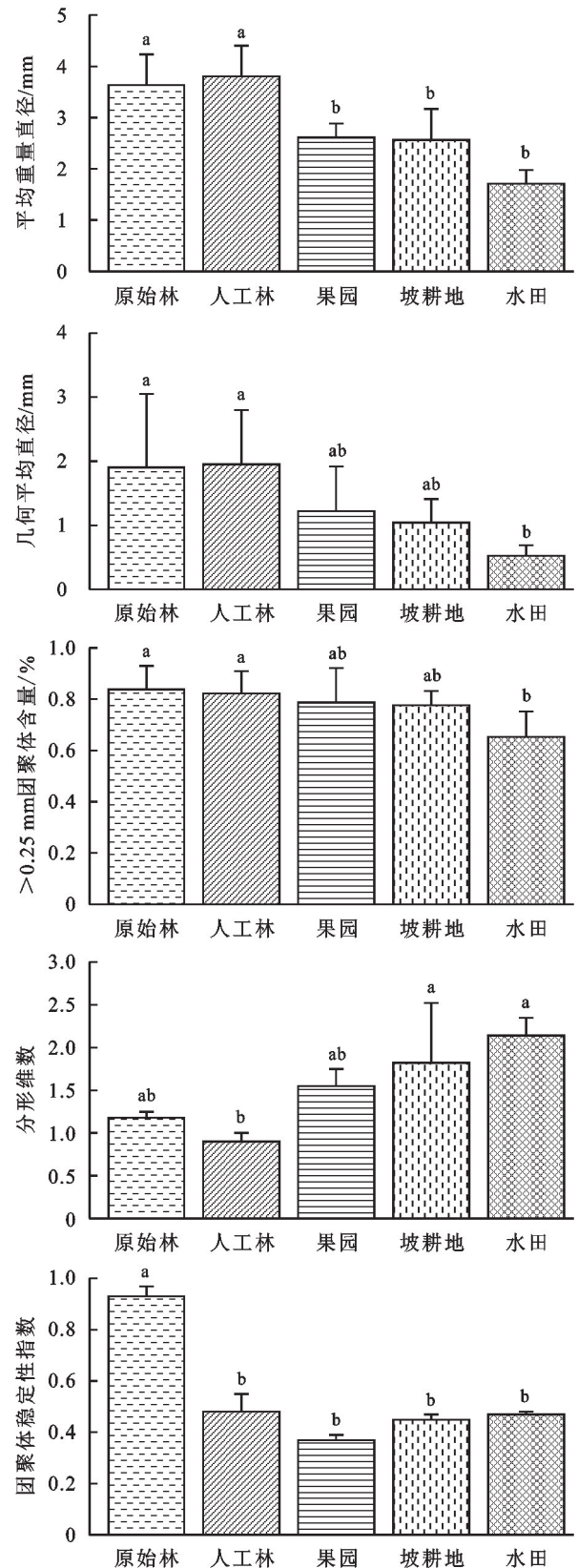


图3 不同土地利用方式土壤团聚体稳定性指标

Fig. 3 Soil aggregate water stability index under various land uses

2.4 土壤物理性质对原始林转换的响应比值

原始林转换为人工林、果园,STAB₁₀的RR绝对值最高,分别为-49%和-61%;原始林转换为水田、坡耕地,微团聚体和砾石含量的RR绝对值最高(图4)。土壤物理指标对原始林转换的响应范围取决于转换后的

土地利用类型。原始林转换为人工林、果园、坡耕地和水田,RR绝对值的平均值分别为12%,31%,35%和37%,RR值变化范围分别为-48%~33%,-60%~55%,-52%~76%和-81%~71%。原始林转换为人工林的RR值范围最窄,果园、耕地和水田的范围较宽。

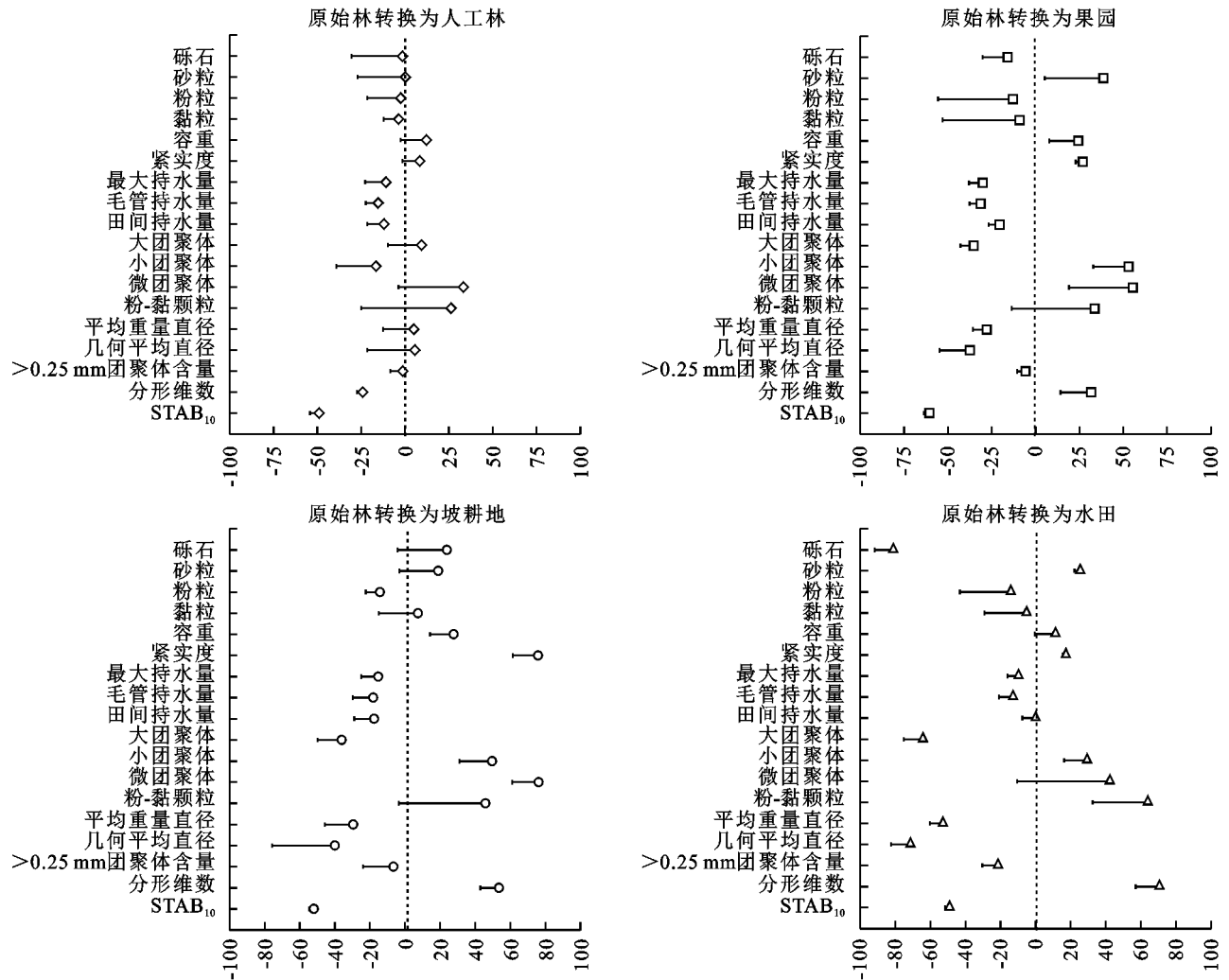


图 4 土壤物理指标对原始林转换的响应比值

Fig. 4 Response ratio (RR) of soil physical indices in response to the primary forest conversion

3 讨论

明确不同土地利用方式土壤物理健康状况,对于保障食物健康生产和维持土壤生态系统多功能性至关重要。原始林转为园地、耕地,土壤砂粒平均含量呈升高趋势(表1),与湘东天然林转换导致花岗岩风化物发育的麻砂质红壤砂粒含量升高趋势基本一致^[8]。原因可能是,中亚热带降雨量大,季节性暴雨冲刷导致表土细颗粒流失,剩下抗搬运能力强的砂粒,土壤颗粒组成呈粗骨化^[17]。然而原始林转换后,粉粒和黏粒平均含量呈下降趋势,与毗邻花岗岩发育红壤呈相反趋势,这可能主要与母质类型、土地利用史和土壤熟化程度有关^[8]。容重和紧实度指示土壤

疏松状况,直接影响土壤孔隙性、结构性、通气性和透水性,受土地利用方式的调控。原始林转换为果园、坡耕地,显著增加土壤容重和紧实度(图1)。主要原因可能是,频繁耕作、人为践踏和较强的地表侵蚀,可能导致果园和坡耕地表土紧实化。值得关注的是,未观察到原始林、人工林和水田土壤容重、紧实度有显著差异。人工林干扰相对较少,地表枯枝落叶现存相对更多,杉木根系生长分布也比农作物更深,而水田连年频繁水耕熟化,形成松软的水耕表层,土壤相对疏松、紧实胁迫程度低^[18-19]。

持水能力是决定土壤生态系统水源涵养能力的重要因素之一。与原始林相比,转换后土地利用方式的土壤最大持水量、毛管持水量和田间持水量均呈下

降的趋势(图2),这意味着原始林转换不利于涵养水源^[20]。特别是,原始林转换为果园、坡耕地,土壤最大持水量、毛管持水量和田间持水量大幅下降,直接反映果园、坡耕地土壤持水能力远低于原始林。中亚热带原始林植被覆盖转换导致地表枯枝落叶层厚度和现存量大幅锐减,表土有机质贮量减少,植被截留容量降低,水分蒸发量大,可能削弱土壤水分保蓄能力^[21]。本课题组研究表明,本区天然林转换为人工林、果园和坡耕地,地表枯枝落叶层平均厚度由4 cm锐减至约0.5 cm,枯枝落叶现存量由7.6 t/hm²降低至0.5 t/hm²,枯枝落叶层理水能力下降^[11,18]。土壤中粗腐殖化有机质的黏结性、保水性很强。天然林转换导致表土有机碳及其活性组分大幅下降42%~88%,很可能减少土壤有机质及其胶结团聚体的保水贮水能力^[10,21-22]。未观察到原始林与水田土壤持水、田间持水量有显著差异,这暗示着原始林转换为水田,相对有利于土壤水分保持、供应作物水分。水田土壤有机质含量相对果园和坡耕地较高,连年水稻秸秆还田形成土壤多糖胶体富含亲水基团,有利于土壤保水持水^[10,23]。中亚热带季节性干旱频繁,山丘区果园、旱地较多分布,应充分重视提高山丘区果园、旱地土壤理水保水和抗旱能力。

土壤团聚体组成指示土壤结构优劣。大团聚体含量反映土壤结构稳定性,它是维持生态系统功能服务的保障^[24]。与原始林相比,水田土壤大团聚体含量降低64%(表2)。原因可能是,水田长期淹水、频繁水耕熟化以及施用石灰,可能分散、破坏水稻土大团聚体结构,降低大团聚体含量^[4]。然而,高强度土地管理活动(频繁耕作、施肥、灌溉和除草)破坏土壤大团聚体,导致原始林转换为果园、坡耕地和水田土壤小团聚体平均含量显著增加,这与前人研究结果基本一致^[25]。土壤团聚体MWD,GWD, $R_{0.25}$ 和D值一般用于衡量团聚体结构稳定性^[26]。原始林转换为果园、坡耕地和水田,土壤团聚体MWD,GWD和STAB₁₀值降低,而D增加(图3)。这表明,原始林转换为园地、耕地,土壤团聚体稳定性降低。亚马逊盆地热带天然林转换为农用地,土壤中>2 mm大团聚体含量和团聚体稳定性指标均显著降低^[27]。原始林植物根系生物量高,不仅物理缠绕土壤颗粒,也通过根系分泌活性有机物胶结土壤颗粒,有利于维持土壤团聚体结构稳定。然而,园地、耕地人为干扰频繁且强烈(例如:整地、翻耕和种植),形成可蚀性强的土壤表层,不利于维持土壤团聚体结构稳定^[19,28]。原始林转换为人工林,未降低土壤团聚体稳定性,可能与杉木人工林人工干扰较少、根系生物量和土壤有机质水平较高有关^[29-30]。原始林转换为人工林,土壤物理指标响应比值小于原始林转换为园地、耕地,这暗示原始林转换为杉木人工林,更有利

于维持土壤物理健康(图4)。从土壤结构稳定性和抗蚀能力看,杉木人工林是中亚热带丘陵山区水土保持效果较为理想的土地利用方式。

土壤物理健康对原始林转换响应的敏感性,取决于特定土壤物理性质和转换后的土地利用方式。在所有测定的土壤物理指标中,以STAB₁₀的响应比值最大、响应方向一致且对原始林转换为不同土地利用方式均很敏感(图4),可以有效指示原始林转换后土壤团聚体稳定性变化。土壤团聚体结构稳定性与土壤环境因子(水、气、热、养分和污染物)、植物根系生长和微生物组多样性的关系非常密切,团聚体组成与稳定性是土壤健康评价的关键指标^[3]。土壤STAB₁₀值取风干原状土即可测试,室内测试程序简单,成本低,易于推广应用。本研究印证并推荐土壤STAB₁₀值作为土壤健康评估方法/工具中关键的土壤物理指标^[16]。

4 结论

中亚热带原始林转换为园地、耕地,表土砂粒含量增加,颗粒组成呈粗骨化;容重和紧实度大幅增加,表土明显压实。原始林转换为果园、坡耕地和水田,土壤最大持水量、毛管持水量和田间持水量显著降低,土壤持水能力下降。土壤大团聚体含量、平均重量直径、几何平均直径和团聚体稳定性指数下降,小团聚体、微团聚体、粉—黏颗粒含量和分形维数增加,指示土壤结构劣化和物理健康退化。

土壤物理健康对原始林转换响应的敏感性,取决于原始林转换后的土地利用方式和特定物理指标。与原始林转换为园地、耕地相比,原始林转换为人工林,土壤物理指标响应相对不敏感。在中亚热带丘陵山区,与其他土地转换方式和用途调整相比,原始/天然林转换为人工林,相对有利于涵养水源、保持水土和维持土壤物理健康。在土壤物理指标中,土壤团聚体稳定性指数(STAB₁₀)响应敏感、测试简单且成本低,推荐应用于土壤健康评价。

参考文献(References):

- [1] Tamburini G, Bommarco R, Wanger T C, et al. Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield[J]. *Science Advances*, 2020,6(45):eaba1715.
- [2] Bagnall D K, Rieke E L, Morgan C L S, et al. A minimum suite of soil health indicators for North American agriculture[J]. *Soil Security*, 2023,10:100084.
- [3] 张丹丹,盛浩,肖华翠,等.土壤健康的评价方法及应用[J].*土壤与作物*,2023,12(1):109-116.
Zhang D D, Sheng H, Xiao H C, et al. Assessment methods of soil health and their applications[J]. *Soils and Crops*, 2023,12(1):109-116.

- [4] 尹泽润,盛浩,刘鑫,等.双季稻酸紫泥田土壤健康对连续单施有机肥、石灰的响应[J].中国农业科学,2023,56(19):3829-3842.
- Yin Z R, Sheng H, Liu X, et al. Response of paddy soil health to continuous amendments of organic fertilizer and lime separately under double-cropping rice fields[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023,56(19):3829-3842.
- [5] 任婷婷,王瑄,孙雪彤,等.不同土地利用方式土壤物理性质特征分析[J].水土保持学报,2014,28(2):123-126.
- Ren T T, Wang X, Sun X T, et al. Characterization of soil physical properties under different land use types[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014,28(2):123-126.
- [6] 邹文秀,韩晓增,陆欣春,等.不同土地利用方式对黑土剖面土壤物理性质的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):187-193,199.
- Zou W X, Han X Z, Lu X C, et al. Effect of land use types on physical properties of black soil profiles[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015,29(5):187-193,199.
- [7] Duan L X, Sheng H, Yuan H, et al. Land use conversion and lithology impacts soil aggregate stability in subtropical China[J]. *Geoderma*, 2021,389:114953.
- [8] 张高玲,谢红霞,盛浩,等.亚热带山区红壤可蚀性对土地利用变化的响应[J].长江科学院院报,2022,39(2):63-69.
- Zhang G L, Xie H X, Sheng H, et al. Erodibility of red soil in subtropical hilly region in response to land use change[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022,39(2):63-69.
- [9] Xiao H C, Sheng H, Zhang L N, et al. How does land-use change alter soil microbial diversity, composition, and network in subtropical China[J]. *Catena*, 2023,231:107335.
- [10] 肖华翠,李雪,盛浩,等.湘西北天然林转换对土壤活性有机碳与酶活性的影响[J].水土保持通报,2023,43(5):411-418.
- Xiao H C, Li X, Sheng H, et al. Effects of native forest conversion on soil labile organic carbon and enzyme activity in northwestern Hunan Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(5):411-418.
- [11] Sheng H, Zhou P, Zhang Y Z, et al. Loss of labile organic carbon from subsoil due to land-use changes in subtropical China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015,88:148-157.
- [12] 潘博,段良霞,张凤,等.红壤剖面土壤养分对土地利用变化响应的敏感性[J].生态学杂志,2018,37(9):2707-2716.
- Pan B, Duan L X, Zhang F, et al. Responsive sensitivity of nutrients in red soil profile to land use change[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018,37(9):2707-2716.
- [13] Yu Q, Wang H, Wen P F, et al. A suitable rotational conservation tillage system ameliorates soil physical properties and wheat yield: An 11-year in-situ study in a semi-arid agroecosystem [J]. *Soil and Tillage Research*, 2020,199:104600.
- [14] 邹文安,姜波,顾李华.土壤水分常数的测定[J].水文,2015,35(4):62-66.
- Zou W A, Jiang B, Gu L H. Measurement of soil moisture constants[J]. *Journal of China Hydrology*, 2015,35(4):62-66.
- [15] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986,50(3):627-633.
- [16] Rieke E L, Bagnall D K, Morgan C L S, et al. Evaluation of aggregate stability methods for soil health[J]. *Geoderma*, 2022,428:116156.
- [17] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等.土地退化/恢复中土壤可蚀性动态变化[J].农业工程学报,2009,25(2):56-61.
- Zhu B B, Li Z B, Li P, et al. Dynamic changes of soil erodibility during process of land degradation and restoration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009,25(2):56-61.
- [18] 盛浩,周萍,李洁,等.中亚热带山区深层土壤有机碳库对土地利用变化的响应[J].生态学报,2014,34(23):7004-7012.
- Sheng H, Zhou P, Li J, et al. Response of deep soil organic carbon storage to land-use changes in subtropical hilly region of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014,34(23):7004-7012.
- [19] Jiang X J, Wang H F, Zakari S, et al. Assessing the impact of forest conversion to plantations on soil degradation and forest water conservation in the humid tropical region of Southeast Asia: Implications for forest restoration[J]. *Geoderma*, 2023,440:116712.
- [20] Abrol V, Sharma R K, Sharma V, et al. Landuse impact on soil physical variability and erodibility in North Western subtropics of India[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2019,40(4):668-673.
- [21] 王明慧,黄来明,陈翠柏.西藏高寒区不同土地利用方式下土壤持水能力差异及其影响因素[J].应用生态学报,2022,33(12):3287-3293.
- Wang M H, Huang L M, Chen C B. Difference in soil water holding capacity and the influencing factors under different land use types in the alpine region of Tibet, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022,33(12):3287-3293.
- [22] Nath A J, Brahma B, Sileshi G W, et al. Impact of land use changes on the storage of soil organic carbon in active and recalcitrant pools in a humid tropical region of India[J]. *Science of the Total Environment*, 2018,624:908-917.
- [23] 张奇,陈黎,陈效民,等.不同秸秆还田深度对黄棕壤土壤物理性质及其剖面变化的影响[J].土壤通报,2020,

- 51(2):308-314.
- Zhang Q, Chen C, Chen X M, et al. Effects of different depths of straw returning to field on soil physical properties and profile changes of yellow brown soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020,51(2):308-314.
- [24] Morris E K, Morris D J P, Vogt S, et al. Visualizing the dynamics of soil aggregation as affected by arbuscular mycorrhizal fungi[J]. The ISME Journal, 2019, 13(7):1639-1646.
- [25] Meng M J, Li C, Zhao Y P, et al. Long-term forest conversion affects soil stability and humic substances in aggregate fractions in subtropical China[J]. Forests, 2022,13(2):339.
- [26] Chaplot V, Cooper M. Soil aggregate stability to predict organic carbon outputs from soils[J]. Geoderma, 2015, 243:205-213.
- [27] Souza F G, Campos M C C, Pinheiro E N, et al. Aggregate stability and carbon stocks in Forest conversion to different cropping systems in Southern Amazonas, Brazil[J]. Carbon Management, 2020,11(1):81-96.
- [28] Das S, Bhattacharyya R, Das Saha N, et al. Soil aggregate-associated carbon and organic carbon pools as affected by conversion of forest lands to agriculture in an acid soil of India[J]. Soil and Tillage Research, 2022,223:105443.
- [29] Yang Y S, Guo J F, Chen G S, et al. Effects of forest conversion on soil labile organic carbon fractions and aggregate stability in subtropical China[J]. Plant and Soil, 2009,323:153-162.
- [30] Chen Q, Liu Y Q, Huang J H, et al. Soil water movement changes following conversion from evergreen and deciduous broad-leaved mixed forests to Chinese fir plantations[J]. Journal of Soils and Sediments, 2023, 23(7):2712-2725.

(上接第 327 页)

- [26] 刘珍,文彦君,韩梅,等.人类活动影响下的陕西省水资源脆弱性评价[J].水资源与水工程学报,2017,28(3):82-86.
- Liu Z, Wen Y J, Han M, et al. Evaluation of water resources vulnerability under the influence of human activities in Shaanxi Province[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2017,28(3):82-86.
- [27] 刘引鸽,杨雨欣,包江川,等.基于模糊综合指数法的陕西省水资源脆弱性评价[J].水资源与水工程学报, 2022,33(6):18-27.
- Liu Y G, Yang Y X, Bao J C, et al. Water resources vulnerability assessment of Shaanxi Province based on fuzzy comprehensive index method[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2022,33(6):18-27.
- [28] 赵浩,赵立磊,田辉,等.基于博弈论组合赋权-TOPSIS模型的安康市水资源承载力综合评价[J].地质与资源, 2023,32(5):642-654.
- Zhao H, Zhao L L, Tian H, et al. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Ankang city based on game theory combination weighting-topsis model [J]. Geology and Resources, 2023,32(5):642-654.

(上接第 335 页)

- [26] 金贵,王占岐,胡学东,等.基于模糊证据权模型的青藏高原区土地适宜性评价[J].农业工程学报,2013,29(18):241-250.
- Jin G, Wang Z Q, Hu X D, et al. Land suitability evaluation in Qinghai-Tibet Plateau based on fuzzy weight of evidence model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013,29(18):241-250.
- [27] 李汝资,刘耀彬,谢德金.中国产业结构变迁中的经济效率演进及影响因素[J].地理学报,2017,72(12): 2179-2198.
- Li R Z, Liu Y B, Xie D J. Evolution of economic efficiency and its influencing factors in the industrial structure changes in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(12): 2179-2198.
- [28] 陈丹玲,卢新海,张超正.区域一体化背景下城市土地利用效率的空间关联及其解释:以长江中游城市群为例[J].华中农业大学学报:社会科学版,2019(4):151-159,177-178.
- Chen D L, Lu X H, Zhang C Z. Study on the spatial correlation and explanation of urban land utilization efficiency under the background of regional integration: A case of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Huazhong Agricultural University: Social Sciences Edition, 2019(4):151-159, 177-178.
- [29] 姚澜.东北地区城市土地利用效率评价及空间演化分析[D].辽宁大连:辽宁师范大学,2019.
- Yao L. Urban Land Use Efficiency Evaluation and Spatial Evolution Analysis in Northeast China[D]. Dalian, Liaoning: Liaoning Normal University, 2019.