

北方土石山区板栗林土壤退化特征

熊恒逸¹, 符素华¹, 魏欣¹, 刘瑛娜¹, 丁建新^{2,3}, 徐发军³

(1.北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2.北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875; 3.北京市水生态保护与水土保持中心, 北京 101117)

摘要: [目的] 对北方土石山区板栗林的土壤侵蚀及土壤质量进行定量分析, 评估该区板栗林下土壤退化情况, 为北方土石山区经济林下水土保持研究和治理提供理论依据。[方法] 于 2022—2024 年, 对北京密云朱家湾和怀柔八道河两个流域内板栗林及其周边灌木林下土壤的土壤侵蚀模数、土壤颗粒级配、有机质、全氮等 12 个指标进行调查, 分析土壤肥力、土壤粗化程度和侵蚀强度, 并通过主成分分析(PCA)评估土壤质量指数(SQI)。[结果] ①未采取措施的板栗林的年平均土壤侵蚀模数是灌木林的 8.3 倍, 2023—2024 年, 汛期后板栗林下的细沟侵蚀模数均超过了 13 000 t/km², 林下侵蚀非常强烈; ②板栗林表层 1 cm 土壤的粗砂(0.5~2 mm)含量约为相邻灌木林的 1.3 倍, 呈现土壤粗化的趋势; ③板栗林土壤中有有机质、全氮和碱解氮的平均值不到相邻灌木林的 1/4, 速效钾的平均值约为相邻灌木林的 1/2, 有效磷和缓效钾存在富集现象; ④板栗林的 SQI 值显著低于灌木林($p=0.025<0.05$)。[结论] 北方土石山区板栗林下的土壤存在侵蚀强烈、土壤粗化和肥力流失的问题, 其土壤质量比周边灌木林下的土壤质量差, 需要实施科学的土地治理措施。

关键词: 板栗林; 土壤质量指数; 土壤侵蚀; 土壤肥力; 北方土石山区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0124-11

中图分类号: S158.1

文献参数: 熊恒逸, 符素华, 魏欣, 等. 北方土石山区板栗林土壤退化特征[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 124-134. Xiong Hengyi, Fu Suhua, Wei Xin, et al. Soil degradation under chestnut forest at earth-rocky mountainous area in northern China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 124-134. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.027; CSTR:32312.14.stbctb.2025.05.027.

Soil degradation under chestnut forest at earth-rocky mountainous area in northern China

Xiong Hengyi¹, Fu Suhua¹, Wei Xin¹, Liu Yingna¹, Ding Jianxin^{2,3}, Xu Fajun³

(1.State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal

University, Beijing 100875, China; 2.College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875,

China; 3.Beijing Water Ecological Protection and Soil and Water Conservation Center, Beijing 101117, China)

Abstract: [Objective] The soil erosion and quality under chestnut forests were quantitatively analyzed at earth-rocky mountainous area in northern China to provide a theoretical basis for studying, managing, and conserving the soil and water in economic forests in mountainous area with rocky soil in northern China. [Methods] Twelve soil parameters, such as soil erosion modulus, soil particle size distribution, organic matter, and total nitrogen, were measured for chestnut forests and the surrounding shrub forests in the Zhujiawan (Miyun District) and Badaohe (Huairou District) watersheds in Beijing City from 2022 to 2024. The soil fertility, soil coarsening degree, and erosion intensity were analyzed, and the soil quality index (SQI) was evaluated using principal component analysis. [Results] ① The annual average soil erosion modulus of the chestnut forest was 8.3 times higher than that of the shrub forest. The rill erosion modulus of the chestnut forest after flood season was more than 13 000 t/km², and the understory erosion was intense from 2023 to 2024. ② The coarse sand (0.5—2 mm) content in the 1 cm soil of the surface was approximately 1.3 times higher on average in the chestnut forest than in

收稿日期: 2025-04-20

修回日期: 2025-06-28

采用日期: 2025-06-30

资助项目: 北京市水土流失监测专项“水土流失动态监测成果分析与应用”(2242000260); 国家自然科学基金项目(42130701)

第一作者: 熊恒逸(2002—), 男(汉族), 云南省昭通市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀机理。Email: 202111051062@mail.bnu.edu.cn。

通信作者: 符素华(1973—), 女(汉族), 四川省岳池县人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀机理与模型研究。Email: suhua@bnu.edu.cn。

the shrub forest, indicating the soil was coarser in the chestnut forest. ③ The average organic matter, total nitrogen, and alkali-hydrolyzed nitrogen contents in the soil of chestnut forest were less than one-quarter of those in the adjacent shrubland. The available potassium content in the chestnut forest soil was approximately half of that in the adjacent shrubland. The available phosphorus and low-availability potassium contents showed enrichment phenomenon in the chestnut forest soil. ④ The SQI of the chestnut forest was significantly lower than that of shrubland ($p=0.025<0.05$). [Conclusion] The soil in chestnut forests at earth-rocky mountainous area in northern China was experiencing severe erosion, soil coarsening, and nutrient loss; the quality of this soil was lower than that of the soil in the surrounding shrub forests. Scientific land management measures need to be implemented to increase the quality of this soil.

Keywords: soil quality index; soil erosion; soil fertility; earth-rocky mountainous area in northern China; soil sustainability

北方土石山区是中国典型的水土流失类型区之一^[1]。该区域地形破碎、地势陡峻、沟壑纵横,极易发生严重的水土流失;同时,该区域土层很薄,一旦发生水土流失,将会对当地珍贵的土地资源造成不可逆的损失,对生态环境和经济发展产生很大的危害。在北方土石山区,土壤侵蚀的类型主要以水蚀为主^[2],该地区内广阔的坡地均是水蚀发生的主要区域。另外,北方土石山区在水土流失严重的同时,却是中国一大经济作物——板栗的重要生产区。中国林草局2022年的统计年鉴显示,北方土石山区内的北京、天津、河北、山东、辽宁、河南等省市均为中国重要的板栗生产大省,2022年总计生产 1.10×10^6 t板栗,占全国产量的46.72%,而中国板栗的单位产量约为 $5.8\text{ t}/\text{hm}^2$ ^[3],由此计算,北方土石山区内的板栗林面积约为 $1\,934.4\text{ km}^2$,按 $7.6\text{ 元}/\text{kg}$ 的板栗价格来算,这些板栗林每年总共能为当地百姓带来约83.16亿元的收入。但是,由于北方土石山区内的板栗林多种植于坡地,加上栗农不合理的管理方式,板栗林下常常发生严重的水土流失和土地退化的问题。因此,研究板栗林下土壤的退化程度,对板栗林地的可持续利用和当地经济的可持续发展具有重要意义。

目前,国内关于板栗林的研究大多集中在提高板栗产量、优化经营模式等农业领域,针对板栗林下土壤的研究相对匮乏^[4]。已有研究表明,栗农常常人为清除板栗林下的地表植被,导致板栗林地出现水土流失^[4]、土壤团聚结构被破坏^[5]、土壤砂粒化^[4,6]、土壤肥力流失^[6]、土壤水文物理性能和抗冲蚀能力下降^[7-8]等问题,同时,还有可能引发水源污染、风沙肆虐等次生环境问题^[4]。此外,还有一些针对板栗林枯落物^[9]和林下水土保持措施^[4,10]的研究。这些研究大多集中在河北燕山山区、太行山区、陕西省以及浙江、福建省等南方地区,这些地区的板栗林下都存在不同程度的土壤退化问题,但是这些研究却未提出一种综合评价土壤质量水平的方法,因此各地之间

的土壤退化程度无法比较。国外的研究也存在与国内相似的问题,针对板栗林下土壤退化的研究比较少见。就已有的研究而言,板栗林具有一定的水土保持效益。例如,板栗树根的生长可能通过使土层变厚来缓解土壤侵蚀^[11],部分板栗林下土壤中全碳、全氮等土壤养分高于混交林^[12]等。但是,人为清除板栗林下枯落物和地表植被的行为会大幅降低板栗林的水土保持效益,从而加剧水土流失和土壤有机质的减少,而当地表植被恢复后,水土流失的问题又会得到一定程度的缓解^[13]。

北京地区是北方土石山区的典型区,也是中国重要的板栗生产地,盛产著名的燕山板栗^[4]。因此,本研究通过对比北京板栗林和相邻灌木林的土壤性质,通过统计学方法综合评价两种林下土壤质量的优劣,评估北方土石山区板栗林土壤的退化情况,这不仅有助于当地科学地治理土地退化,同时也能为北方土石山区经济林下水土保持的研究提供科学参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

北方土石山区是中国水力侵蚀类型区的一个二级类型区。它包括淮南、豫西、沂蒙、太行、燕山山区和东北的西南部,西北的东南部分山区^[14]。北京北部的燕山山区是北方土石山区内的一个典型侵蚀区域,同时,燕山山区的怀柔和密云两个区又是北京的两个主要板栗生产区。因此,本研究在怀柔和密云两个区内各选择一个板栗林种植面积较为集中的小流域作为研究区,即怀柔八道河流域和密云朱家湾流域。两个流域具体的地理位置及流域内的地形起伏如图1所示。①八道河小流域位于怀柔区西南部,介于东经 $116^{\circ}21'$ — $116^{\circ}34'$,北纬 $40^{\circ}21'$ — $40^{\circ}29'$ 。流域北部及西北部为山地,地势高,中部、南部和东部为沟谷,其间分布有山丘,这些山丘为周边村民主

要的板栗种植区,采样点就位于流域南部及东南部山丘中的板栗林和灌木林中。流域气候类型为温带季风性气候,四季分明,夏季炎热湿润,冬季寒冷干燥,年平均气温 $9\sim 13\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水为 600 mm 。土壤类型主要为棕壤和褐土,土质疏松。主要植被为板栗、侧柏和油松等。②朱家湾小流域位于密云区东南部,介于东经 $117^{\circ}6'\text{—}117^{\circ}10'$,北纬 $40^{\circ}27'\text{—}40^{\circ}31'$ 。

流域西南部为山地,东北部为平原,二者之间有许多山丘沟谷,为周边村民的板栗种植区。采样点位于流域中部偏北的板栗林和灌木林中。流域气候属温带季风性气候,四季分明,夏季炎热湿润,冬季寒冷干燥,年平均气温为 $11\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降雨量为 600 mm 。土壤类型主要为淋溶褐土,土壤结构疏松。区域内主要的植物为板栗、刺槐、油松、侧柏、核桃和荆条等。

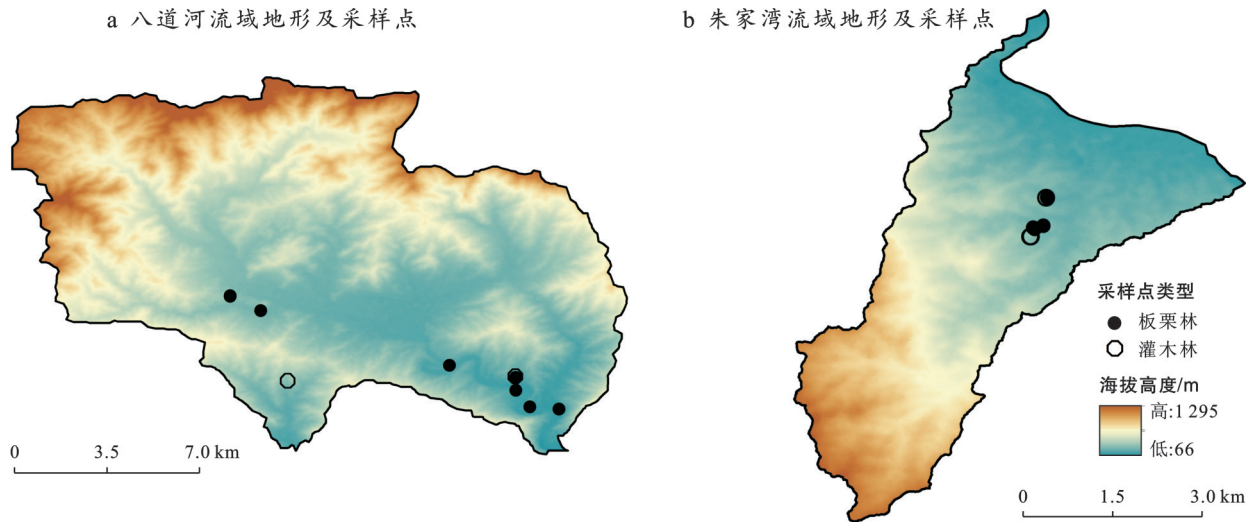


图 1 研究区地形及采样点分布

Fig.1 Topography and distribution of sampling points in study area

1.2 土样采集与测定

于2022年夏天选择怀柔八道河和密云朱家湾两个流域的板栗林地块进行调查(表1)。在两个流域内选择大面积种植的板栗林作为采样点,并在所选板栗林附近选择与之环境相似的灌木林用于对比。按照不同的坡度等级,选择不同坡度的板栗林及其周边的灌木林,采集两种林下的土样进行土壤理化性质和多年平均土壤侵蚀模数的测定。受野外实际环境的限制,在怀柔共选择8个板栗林样地,2个灌木林样地;在密云共选择4个板栗林样地,4个灌木林样地。每个地块选择3个样点,在每个样点上,按 $0\text{—}15\text{ cm}$ 和 $15\text{—}30\text{ cm}$ 分层用土钻采集土样,用于测定 ^{137}Cs 面积活度和土壤养分。同时,用 $30\text{ cm}\times 30\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 的采样框,收集表层 1 cm 的土样,用于土壤级配分析。另外,在2022—2024年,每年对两个流域汛期后的板栗林地进行细沟侵蚀调查。选择流域内面积较大且存在人为清除地表植被现象的板栗林,进行林下细沟侵蚀调查。由于野外实际环境的限制,最终,在密云朱家湾,选择了3块典型板栗林地,地块坡度分别为 28° , 30° 和 33° ;在怀柔八道河,选择了1块典型板栗林地,地块坡度为 28° 。调查地块宽 10 m ,调查长度为所在地块的坡长;从坡上至坡

下,每隔 2 m 布设一个测量断面,在每个断面上测量距分水岭的距离、距坡左侧的距离、细沟深、细沟宽等参数。在每个地块上采集3个环刀样测量土壤容重。

采集的土样带回实验室测量各指标。用沉降法测量土壤粒级^[15],用环刀法测量土壤容重^[16],用重铬酸钾氧化-外加热法测量土壤有机质含量^[17],用凯氏定氮法测量土壤全氮含量^[18],用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测量土壤全磷含量^[19],用氢氧化钠熔融-火焰光度法测量土壤全钾含量^[20],用碱解扩散法测量土壤碱解氮含量^[21],用氢氧化钠浸提-钼锑抗比色法测量土壤有效磷含量^[22],用醋酸铵浸提-火焰光度法测量土壤速效钾含量^[23],用硝酸提取-火焰光度法测量土壤缓效钾^[23],用 γ 能谱仪进行 ^{137}Cs 面积活度的测定^[24]。

1.3 数据处理分析

利用统计软件进行数据处理和制图。使用Excel软件对数据进行整理,计算板栗林下多年平均土壤侵蚀模数和细沟侵蚀模数,并通过隶属度函数对各指标进行标准化处理,随后使用SPSS中的因子分析功能对数据进行主成分分析(PCA),计算不同林下的土壤质量指数(SQI),并使用Mann-Whitney U非参数检

验,对不同林下的土壤质量指数差异进行验证。最后,使用Origin软件,利用统计的结果进行制图。

表1 采样地块基本信息
Table 1 Basic information of sampling plots

编号	经度/(°)	纬度/(°)	土地利用	坡度/(°)	备注
HRBL ₁	116.551	40.374	板栗林	0	石坎梯田
HRBL ₂	116.541	40.375	板栗林	20	
HRBL ₃	116.514	40.389	板栗林	30	
HBBL ₄	116.450	40.408	板栗林	0	沟底平地
HRBL ₅	116.439	40.412	板栗林	20	
HRBL ₆	116.439	40.413	板栗林	25	
HRBL ₇	116.536	40.385	板栗林	18	
HRBL ₈	116.536	40.381	板栗林	24	
HRGM ₁	116.536	40.385	灌木林	31	
HRGM ₂	116.459	40.384	灌木林	25	
MYBL ₁	117.137	40.499	板栗林	38	
MYBL ₂	117.135	40.494	板栗林	24	
MYBL ₃	117.136	40.494	板栗林	29	
MYBL ₄	117.137	40.494	板栗林	17	
MYGM ₁	117.137	40.499	灌木林	48	
MYGM ₂	117.135	40.493	灌木林	35	
MYGM ₃	117.135	40.493	灌木林	18	
MYGM ₄	117.135	40.493	灌木林	23	

注:样地按照“所属行政区首字母+林分类型首字母+数字”的格式进行编号,如HRBL₁就表示怀柔区调查的第1块板栗林样地。

1.3.1 评价指标隶属度值

在进行土壤质量评价之前,需要先对土壤各指标进行标准化处理。本研究通过隶属度函数计算各指标的隶属度值,消除量纲和单位的影响。根据植物的生长效益不同,可将隶属度函数分为S型和抛物线型两种。为了便于计算,将曲线函数转化为相应的折线函数,并将各指标及其转折点代入公式得到隶属度值^[25]。

(1) S型隶属度函数。符合该函数的指标,总体而言,其对土壤质量的贡献率随指标的增大而增大。当指标处于某一范围内,其对土壤质量的贡献率变化较大,当指标低于或高于该范围时,其对土壤的贡献率几乎不变,分别维持在较低和较高的水平。在本研究中,符合S型隶属度函数的指标有:有机质、全氮、全磷、全钾、有效磷、速效钾、缓效钾和碱解氮。S型隶属度函数的计算公式为

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & (x < x_a) \\ 0.1 + \frac{0.9(x - x_a)}{x_b - x_a} & (x_a \leq x < x_b) \\ 1 & (x \geq x_b) \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 表示各指标的数值; x_a, x_b 表示两个转折点。在 x_a 和 x_b 之间,各土壤养分含量的增加能明显促进植物的生长,而低于 x_a 或高于 x_b 时,各土壤养分含量的增加对植物的生长并没有明显的促进作用。根据国土资源部制定的标准和全国第2次土壤普查制定的分级依据^[26-27],各项土壤肥力指标转折点的具体取值详见表2。

表2 各项土壤肥力指标的转折点
Table 2 Turning points of each soil fertility indicator

指标	转折点	
	x_a	x_b
有机质/(g·kg ⁻¹)	10	40
全氮/(g·kg ⁻¹)	0.75	2
全磷/(g·kg ⁻¹)	0.4	1.0
全钾/(g·kg ⁻¹)	10	25
有效磷/(mg·kg ⁻¹) ^①	10	40
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	50	200
缓效钾/(mg·kg ⁻¹)	100	700
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	30	150

注:①有效磷超出一定浓度,会产生环境污染风险,其环境阈值为80 mg/kg。

(2) 抛物线型隶属度函数。符合该函数的指标,当数值过大或者过小时,对土壤质量的贡献率都很低,只有处于一定范围的时候,其对土壤质量的贡献率较高。土壤质地过于黏重或过于疏松都不利于植物的生长,符合抛物线型隶属度函数。抛物线型隶属度函数的计算公式为

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & (x < x_a \text{ 或 } x \geq x_d) \\ 0.1 + \frac{0.9(x - x_a)}{x_b - x_a} & (x_a \leq x < x_b) \\ 1 - \frac{0.9(x - x_c)}{x_d - x_c} & (x_c \leq x < x_d) \\ 1 & (x_b \leq x < x_c) \end{cases} \quad (2)$$

式中: x 表示各指标的数值, x_a, x_b, x_c 和 x_d 分别表示4个转折点。由于土壤质地为概念型指标,无具体数值,因此参考农业农村部耕地质量监测保护中心制定的标准(土壤主要性状指标分级征求意见稿),先依据实验测定的土壤粒级数据,按照国际制确定各个样地的土壤质地名称。然后,依据表3对不同质地的土壤进行分级并赋值,其中,土壤从砂土到壤土,再到黏土,一共分为I—VII共7个等级,分别对应赋值为1—7,表示土壤质地从过于疏松到过于黏重的变化。土壤质地等级赋值介于3~5之间时,最有利

于植物生长;土壤质地等级赋值越接近 1 或 7 时,越不利于植物的生长。因此,结合抛物线型隶属度函

数的定义,将 1,3,5,7 分别对应设定为转折点 x_a, x_b, x_c 和 x_d 。

表 3 土壤质地分级标准及转折点

Table 3 Soil texture grading standards and turning points

分级	赋值	对应转折点	分级释义	国际制质地名称
I	1	x_a	不适宜	砂土及壤质砂土
II	2		较不适宜	砂壤土
III	3	x_b	较适宜	粉(砂)质壤土
IV	4		适宜	壤土
V	5	x_c	较适宜	砂质黏壤土、黏壤土、粉(砂)质黏壤土
VI	6		较不适宜	砂质黏土、壤质黏土、粉(砂)质黏土
VII	7	x_d	不适宜	黏土、重黏土

1.3.2 细沟侵蚀模数

通过测量暴雨后板栗林细沟的各参数计算板栗林下细沟侵蚀模数。每个样带细沟体积计算公式为

$$a_i = \sum_j^n (b_{ij} \cdot h_{ij}) \quad (3)$$

$$V_k = \sum_i^m \left[\frac{1}{2} (a_{i-1} + a_i) \times L_i \right] \quad (4)$$

式中: a_i 为第*i*个断面上细沟剖面的总面积(m^2); b_{ij} , h_{ij} 分别为第*i*个断面上从左到右第*j*条细沟的宽度(m)和深度(m); V_k 表示一个地块上细沟的体积(m^3); L_i 表示第*i*和第*i-1*个断面之间的长度(m); n 表示某个断面上细沟的数量; m 表示地块被断面分割的段数。

每个样带细沟侵蚀模数计算公式为

$$M_k = V_k \times \rho / (A_k \times \cos \theta) \quad (5)$$

式中: M_k 表示第*k*个样带的细沟侵蚀模数(t/km^2); ρ 表示土壤容重(t/m^3); A_k 表示地块面积(km^2); θ 表示地块的坡度($^\circ$)。每个地块细沟标准化侵蚀模数 MS_k 的计算公式为:

$$MS_k = M_k / S_k \quad (6)$$

式中: S_k 表示第*k*个样带的坡度因子, S_k 的取值如下:

$$S_k = \begin{cases} 10.8\sin\theta + 0.03 & (\theta < 5^\circ) \\ 16.8\sin\theta - 0.5 & (5^\circ \leq \theta < 10^\circ) \\ 21.9\sin\theta - 0.96 & (\theta \geq 10^\circ) \end{cases} \quad (7)$$

1.3.3 ^{137}Cs 土壤侵蚀模型

如何准确计算 ^{137}Cs 的流失与土壤再分布间的定量关系是 ^{137}Cs 土壤侵蚀示踪技术的关键。He Q 等^[24]提出的质量平衡模型(MBM2)综合考虑了 ^{137}Cs 在土壤剖面中随时间的变化,即 ^{137}Cs 在不同时间的沉降量及衰变量、随土壤的流失量、随颗粒的选择性迁移以及土壤翻耕的稀释等。由于北京山区板栗林

地经常会有除草、翻耕、施肥等人为扰动,因此,选择耕地质量平衡模型(MBM2)计算板栗林地的土壤侵蚀速率。

$$\frac{dA(t)}{dt} = (1 - \Gamma)I(t) - \left(\lambda + P \frac{R}{d_m} \right) A(t) \quad (8)$$

$$\text{其中: } \Gamma = P\gamma(1 - e^{-R/H}) \quad (9)$$

式中: $A(t)$ =单位面积土壤的 ^{137}Cs 含量(Bq/m^2); t 为 ^{137}Cs 沉降开始到采样时的年份; $I(t)$ =在*t*的 ^{137}Cs 沉降量, (Bq/m^2),其多年累积量即为采样区的 ^{137}Cs 背景值; Γ 为新沉降的 ^{137}Cs 在混入耕作层之前的损失率; P 为颗粒校正因子,即沉积土壤与侵蚀迁移土壤的 ^{137}Cs 活度之比,一般大于 1.0,因为 ^{137}Cs 易吸附在易迁移的且粒径较小的土壤颗粒表面; γ 为在耕作活动之前耕作土壤上的 ^{137}Cs 年沉降量易受到侵蚀的比例,其值由耕作时间和当地的降雨时间分布确定; d_m 为耕作层土壤累积质量深度(kg/m^2); R 为年侵蚀速率 [$kg/(m^2 \cdot a)$]; H 为 ^{137}Cs 在整个土壤剖面的初始分布累积质量深度(kg/m^2); $\lambda=0.9773$, ^{137}Cs 衰变常数。

分别选择怀柔 and 密云板栗林采样地旁的灌木林地作为 ^{137}Cs 背景值采样点,怀柔 and 密云 2022 年平均 ^{137}Cs 背景值为 $1\ 910\ Bq/m^2$ 。

1.3.4 主成分分析

主成分分析法是利用统计学原理,将多个指标降维,成为与原指标线性相关的几个数量更少的主成分的方法。首先对标准化后的数据进行 Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)检验和 Bartlett 球形检验,判断其进行主成分分析的适宜性。然后通过主成分分析,挑选出特征值大于 1 的主成分,并依据因子载荷矩阵和主成分特征值计算每个主成分与各个指标之间的主成分系数,构建每个主成分和各个指标之间

的线性关系,主成分系数的计算公式为

$$l_{ij} = r_{ij} / \sqrt{\lambda_i} \quad (10)$$

式中: l_{ij} 表示第 j 个指标对于第 i 个主成分的主成分系数; r_{ij} 表示第 j 个指标对于第 i 个主成分的因子载荷; λ_i 表示第 i 个主成分的特征值。各主成分和各指标之间的线性关系为

$$F_i = \sum_{j=1}^n (l_{ij} X_j) \quad (11)$$

式中: F_i 表示第 i 个主成分; X_j 表示第 j 个指标的隶属度函数值; n 表示指标的数量。

根据公式(11),计算出各主成分的得分。最后,依据所挑选主成分的方差百分比在累计方差百分比中所占的比例,计算各主成分在最终得分,即土壤质量指数(SQI)中的权重,并依据公式(12),计算每个样地的土壤质量指数。

$$SQI = \sum_{i=1}^m (w_i F_i) \quad (12)$$

式中:SQI表示土壤质量指数(soil quality index); w_i 表示第 i 个主成分的权重。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀状况分析

2.1.1 多年平均土壤侵蚀模数

板栗林下的多年平均土壤侵蚀模数高于灌木林,灌木林下的土壤侵蚀模数普遍集中在较低水平。图2为不同地块中林下土壤侵蚀模数大小的分布特征。由图2可知,无措施板栗林下的土壤侵蚀模数介于 $-15.76 \sim 159.52 \text{ t/hm}^2$,石坎梯田板栗林下的土壤侵蚀模数介于 $3.26 \sim 22.73 \text{ t/hm}^2$,灌木林下的土壤侵蚀模数介于 $0.3 \sim 10.94 \text{ t/hm}^2$ 。无措施板栗林下侵蚀模数的平均值(50.00 t/hm^2)大于灌木林(6.00 t/hm^2),是灌木林的8.3倍;而石坎梯田板栗林下土壤侵蚀模数的平均值(13.00 t/hm^2)是灌木林(6.00 t/hm^2)的2.2倍。由图2还可看出,与无措施板栗林相比,石坎梯田板栗林下的土壤侵蚀模数更小,其土壤侵蚀模数的平均值是无措施板栗林的1/4。说明无措施板栗林下的土壤侵蚀最为强烈,灌木林下的土壤侵蚀强度最低,而修建石坎梯田可以有效地缓解板栗林下的土壤侵蚀。

2.1.2 汛期后细沟侵蚀模数

研究区内的板栗林由于缺乏地表植被的保护,本身就很容易发生土壤侵蚀,加之近年来又受大暴雨的影响,所调查的板栗林下土壤受到雨水的强烈冲刷,均发生了非常严重的细沟侵蚀(图3)。2022—

2024年所调查流域汛期降雨量和汛期后板栗林下的细沟侵蚀模数计算结果详见表4。由表4可知,2022—2024年,汛期后怀柔八道河板栗林下的细沟侵蚀模数介于 $79.55 \sim 161.03 \text{ t/hm}^2$,密云朱家湾介于 $30.99 \sim 191.99 \text{ t/hm}^2$ 。两个流域仅林下细沟侵蚀模数就远远超过了中华人民共和国水利部所规定的北方土石山区容许土壤流失量 2 t/hm^2 ^[14]。按照水利部发布的土壤侵蚀分级标准^[14],2022年,八道河流域板栗林下的细沟侵蚀属于强烈侵蚀($50 \sim 80 \text{ t/hm}^2$),朱家湾流域属于中度侵蚀($25 \sim 50 \text{ t/hm}^2$)。2023和2024年,汛期的降雨量相对较大,板栗林下的细沟侵蚀模数也随之增大,八道河流域这两年的细沟侵蚀模数都超过了 160 t/hm^2 ,属于最高级的剧烈侵蚀($>150 \text{ t/hm}^2$)。而朱家湾流域在2023年属于剧烈侵蚀,在2024年属于极强烈侵蚀($80 \sim 150 \text{ t/hm}^2$)。

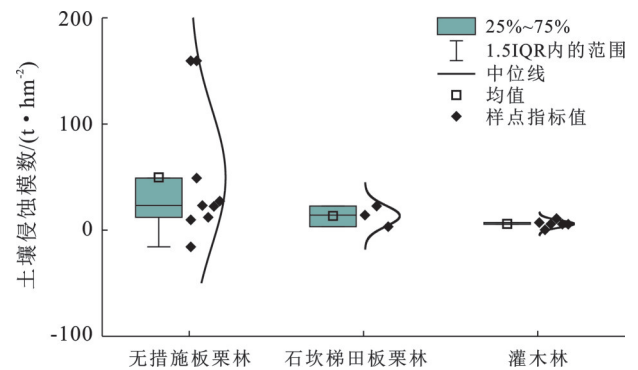


图2 不同地块土壤侵蚀模数分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of soil erosion modulus at different plots

2.2 土壤粗化分析

板栗林和灌木林下土壤表层的粗砂含量也存在较大的差异。通过土壤粒级分析,得到不同地块林下表层1 cm土壤中粗砂(0.5~2mm)含量的分布特征如图4所示。板栗林下土壤表层1cm以内粗砂(0.5~2 mm)的含量介于 $15.05\% \sim 55.51\%$,灌木林下的粗砂含量介于 $3.74\% \sim 56.85\%$,粗砂含量的最大值二者差异不大,最小值板栗林高于灌木林,是灌木林的4倍。灌木林下表层土壤的平均粗砂含量为 28.6% ,而板栗林下为 38.3% ,板栗林下表层土壤的平均粗砂含量大于灌木林,是灌木林的1.3倍。同时,板栗林下表层土壤中的粗砂含量集中于较高水平,多数板栗林下表层土壤的粗砂含量集中在 $40\% \sim 50\%$,而灌木林下的粗砂含量则分别集中于较高和较低水平,含量位于 50% 和 5% 左右的数据较多。综上分析,说明板栗林下表层土壤中粗砂的含量整体大于灌木林,具有土壤粗化的趋势。

表 4 2022—2024 年研究区汛期降雨量及汛期后板栗林下细沟侵蚀模数

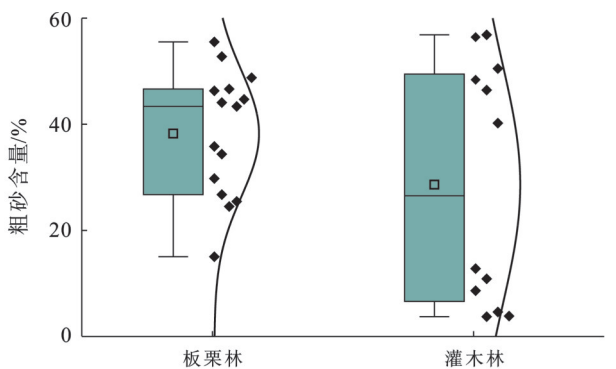
Table 4 Rainfall during flood season in study area and rills erosion modulus under chestnut forest after flood season from 2022 to 2024

年份	怀柔八道河		密云朱家湾	
	汛期降雨量/mm	细沟侵蚀模数/ ($t \cdot hm^{-2}$)	汛期降雨量/mm	细沟侵蚀模数/ ($t \cdot hm^{-2}$)
2022	147	79.55	278	30.99
2023	511	161.03	390	191.99
2024	574	160.69	746	137.94



图 3 研究区板栗林下的细沟侵蚀

Fig.3 Rill erosion under chestnut forest in study area



■ 25%~75% ▮ 1.5IQR内的范围 — 中位线 □ 均值 ◆ 样点指标值

图 4 研究区不同地块表层 1 cm 土壤粗砂含量

Fig.4 Content of coarse sand in top 1 cm soil of different plots in study area

2.3 土壤肥力分析

板栗林下的土壤肥力也存在较大的损耗,表 5 为不同地块中各项土壤肥力指标的描述性统计结果。由表 5 可知,一方面,板栗林下土壤中全钾、缓效钾和有效磷的平均值虽然高于灌木林,但是超出的幅度并不大,且二者的标准差也比较接近,说明全钾、缓效钾和有效磷在两种林下土壤中的差异并不明显。另一方面,板栗林下土壤中有有机质、全氮、全磷、碱解

氮和速效钾的平均值均低于灌木林,其中,有机质、全氮和碱解氮的平均值还不足灌木林的 1/4,速效钾的平均值约为灌木林的 1/2,再比较这些指标的最值和中位数,板栗林都明显低于灌木林,说明板栗林土壤中的有机质、全氮、全磷和速效钾都存在较大的损耗。

值得注意的是在所采样地中,有效磷和缓效钾的含量非常高。两种林下有效磷含量的平均值(板栗林为 177.36 mg/kg,灌木林为 148.65 mg/kg)均远远超出了其环境阈值 80 mg/kg^[27],通过查阅燕山板栗施肥的相关研究^[28],发现不合理的施肥时机可能导致板栗树对养分的吸收效益低下,不同生长期的板栗对不同种类的养分需求也有所不同。结合有效磷和缓效钾在板栗林下土壤中的含量略高于周边灌木林的现象,推测当地栗农可能存在施肥不科学的问题,从而导致磷元素和钾元素在土壤中富集或是随雨水淋失,造成了果园及周边环境的污染。

2.4 土壤质量指数

通过主成分分析对土壤质量进行评价。首先对各指标的隶属度值进行 Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)检验和 Bartlett球形检验。KMO 检验的结果为 0.656 > 0.6, Bartlett球形检验的显著性系数为 0.00 < 0.05,检验通过,说明该数据适合进行主成分分析。通过主成分分析,得到各项土壤指标对土壤质量贡献度的主成分分析结果如表 6 所示。共提取出 2 个特征值大于 1 的主成分,主成分 1 的特征值为 4.14,主成分 2 的特征值为 3.58,两个主成分的累计方差贡献率达到了 85.78%,可以反映数据蕴含的大部分信息。

根据以上主成分分析的结果,可以得到土壤质量指数 SQI 的计算公式为

$$SQI = 0.54F_1 + 0.46F_2 \quad (13)$$

式中: F_1 和 F_2 分别表示主成分 1 和主成分 2 的得分。

根据最大方差法得到旋转后各项土壤指标对两个主成分贡献度载荷分布图(图 5)。该图表达了各项指标对两个主成分的贡献率,点越靠近坐标轴,说明该指标对该坐标轴所表示的主成分贡献率越大,图中各个点之间距离越近,表示各个点所对应的指标之间的相关性越大。由图 5 可知,速效钾、碱解氮、全氮和有机质对主成分 1 的贡献率更大,可认为其属于主成分 1;有效磷、全磷、全钾、缓效钾和质地对主成分 2 的贡献率更大,可认为其属于主成分 2。结合表 6 可知,主成分 1 中的指标对主成分 1 的系数均为正数,且都位于主成分 1 的正半轴,这些指标的值越大,主成分 1 的得分就越大,最终计算的 SQI 就越大,土壤质量就越好。而主成分 2 中的指标——全磷、有效磷和缓效钾,虽位于主成分 2 的正半轴,但对主成

分 2 的系数均为负值;质地和全钾,虽然对主成分 2 的系数均为正值,但却位于主成分 2 的负半轴,因此,主成分 2 中的指标值越大,主成分 2 的得分就越小,最终计算的 SQI 就越小,土壤质量就越差。

表 5 研究区不同地块各项土壤肥力指标描述性统计
Table 5 Descriptive statistics of each soil fertility indicator at different plots in study area

指标	土地利用	平均值	中位数	标准差	最小值	最大值
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	板栗林	62.60	65.08	28.11	24.00	106.00
	灌木林	116.28	117.00	45.06	50.00	176.00
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	板栗林	177.36	190.94	72.96	33.06	297.96
	灌木林	148.65	136.34	83.86	54.13	267.00
碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	板栗林	36.36	35.16	19.57	7.51	63.05
	灌木林	160.33	155.55	106.81	27.20	334.72
全磷/(g·kg ⁻¹)	板栗林	1.09	1.04	0.36	0.31	1.57
	灌木林	1.32	1.47	0.37	0.67	1.67
全钾/(g·kg ⁻¹)	板栗林	19.38	18.93	2.36	15.35	24.21
	灌木林	16.96	15.99	3.52	12.84	21.48
全氮/(g·kg ⁻¹)	板栗林	0.48	0.44	0.26	0.12	0.92
	灌木林	2.20	1.70	1.90	0.35	5.72
有机质/(g·kg ⁻¹)	板栗林	10.01	9.22	5.05	2.77	18.26
	灌木林	46.98	34.84	40.05	8.88	120.17
缓效钾/(mg·kg ⁻¹)	板栗林	1 500.41	1 518.00	745.87	424.83	2 650.33
	灌木林	1 138.83	936.83	732.57	557.00	2 566.33

表 6 各项土壤指标对土壤质量贡献度主成分分析结果
Table 6 Results of principal component analysis on contribution of each soil indicator to soil quality

土壤指标	主成分系数	
	主成分 1	主成分 2
速效钾	0.40	0.24
有效磷	0.24	-0.40
碱解氮	0.42	0.24
全磷	0.20	-0.46
全钾	-0.36	0.19
全氮	0.43	0.22
有机质	0.43	0.24
质地	-0.16	0.39
缓效钾	0.18	-0.46
特征值	4.14	3.58
方差贡献率/%	46.01	39.77
累计方差贡献率/%	46.01	85.78

综上所述,主成分 1 表示对土壤质量提高的有利因子,主成分 2 表示对土壤质量提高的不利因子。同时还发现,磷含量和缓效钾之间的相关性比较高,且都属于主成分 2。由上文的分析可知二者很有可能同为当地栗农施肥后未被土壤吸收的养分,且它

们对于主成分 2 的系数均为负值,说明这些因不合理施肥而残留的肥料会对土壤质量产生较大的损害。

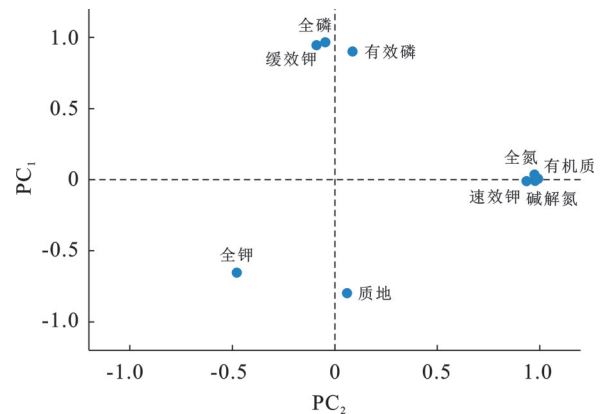


图 5 因子旋转后各项土壤指标对两个主成分贡献度载荷分布

Fig.5 Load distribution of contribution of each soil indicator to two main components after factor rotation

根据公式(13)计算每个样地的土壤质量指数 SQI,并对每个样地的 SQI 大小进行排序,得到不同地块 SQI 大小差异对比的柱状图(图 6)。由图 6 可知,灌木林下的土壤质量指数普遍高于板栗林。土

壤质量指数 SQI 的排名,前 5 名均为灌木林,其土壤质量指数分别为 1.00,0.99,0.92,0.52 和 0.28,前 3 名的 SQI 均大于 0.90。计算不同林下的 SQI 平均值,板栗林的平均 SQI 为 -0.08,而灌木林为 0.58,明显高于板栗林。初步说明,在所选研究区范围内,板栗林的土壤质量劣于灌木林。随后,对两种林下的土壤质量指数进行差异性检验。由于板栗林下的土壤质量指数不符合正态分布(正态检验的显著性系数为 $0.045 < 0.05$),因此对数据进行 Mann-Whitney U 非参数检验,检验的标准化结果为 -2.248,显著性系数

为 $0.025 < 0.05$,说明板栗林的土壤质量指数显著小于灌木林,进一步证明其土壤质量比灌木林差。

另外,图 6 中还存在一个异常值(编号为 HRGM₂ 的样地)。虽然是灌木林,但是其 SQI 值却最小。复核该样地的信息发现,该灌木林紧邻一块板栗林,且该灌木林中还掺有少许几棵板栗树。该样地虽是灌木林,但是其数据特征却和板栗林很相似。因此,推测该块样地可能是废弃的板栗林,其土壤退化的情况还未得到很好的恢复,所以出现了土壤质量较差的现象。

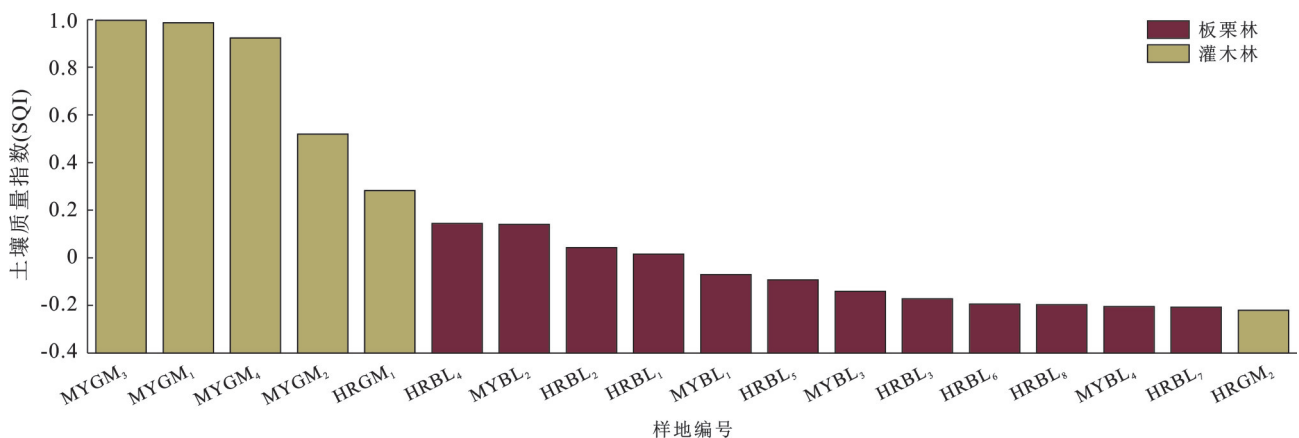


图 6 研究区不同地块土壤质量指数

Fig.6 Soil quality index of different plots in study area

3 讨论

板栗林下存在明显的土壤退化问题,这与栗农清除板栗林下的地表植被密切相关。研究区的土壤本就砾石含量高、土质疏松、土层薄,极易发生水土流失。板栗林下的土壤不仅所处位置坡度大,而且缺少地表植被的保护,暴雨过后,与周围其他的土地类型相比,更容易发生水土流失。在这一过程中,板栗林下土壤侵蚀严重、细沟侵蚀强烈,在雨水冲刷土壤的时候,一方面,表层较小的土壤颗粒会优先被雨水冲走,只留下较大的土壤颗粒,导致土壤粗化;另一方面,土壤中的各种养分会随着雨水的冲刷而流失,导致土壤肥力下降,土壤的综合质量降低。

土壤粗化是土壤退化的一个结果。土壤粗化是指在土壤侵蚀过程中,土壤黏粒随径流迁移损失,而砂粒或砾石等大粒径的土壤颗粒在坡面上沉积、含量增高的现象^[29]。由于有机质等养分更容易吸附在较小的土壤颗粒之上,因此土壤粗化会导致土壤中的养分难以在土壤中保存,而更容易随着水流冲向坡下,最终在坡下部位发生富集,造成环境污染^[30]。这也使得土壤肥力流失的人工修复变得更加困难。

此外,土壤粗化还会导致土质疏松,引起部分植物生长不良,植物根系稳定性降低等问题,最终使得土壤蓄水能力下降,土壤的抗蚀能力降低^[30],更容易发生土壤侵蚀,形成一个恶性循环。

除此之外,板栗林的种植密度、施肥方式以及灌溉方式等因素也可能导致板栗林下土壤侵蚀和退化。板栗林的种植密度可能对土壤侵蚀强度会有一定的影响。因为板栗树的根系本身就具有一定的水土保持效益^[11]。如果板栗树的种植密度较大,可能在一定程度上缓解板栗林下的土壤侵蚀。不合理的施肥方式会导致部分元素在土壤中富集,造成环境污染,降低土壤质量;同时,不合理的施肥方式也会导致板栗树生长不良^[28],从而降低板栗树根的水土保持效益以及板栗树枯落物的数量,这些因素都会对板栗林下的土壤侵蚀强度产生不同程度的影响^[9,11]。在灌溉过程中,如果水流速度过大,很可能人为地造成许多小型侵蚀沟道,而这些沟道在下次降雨时便更容易发生土壤侵蚀。最后,修建工程措施、地表结皮、板栗林种植排列方式等等因素都有可能影响板栗林下的土壤侵蚀和退化,未来还有待更多的研究投入。

4 结论

(1) 板栗林下土壤侵蚀强烈,其多年平均土壤侵蚀模数为灌木林的8.3倍,2022—2024年汛期后板栗林下的细沟侵蚀模数均远超北方土石山区的容许土壤流失量,侵蚀非常剧烈。而修建梯田措施可以有效地缓解板栗林下的土壤侵蚀。

(2) 雨水冲刷导致板栗林下细小的土壤颗粒被不断冲走,表层1 cm土壤的粗砂(0.5~2 mm)含量变高,其平均值约为灌木林的1.3倍,存在土壤粗化的趋势。

(3) 板栗林下土壤存在肥力流失和环境污染的问题。有机质、全氮和碱解氮的平均值不足灌木林的1/4,速效钾的平均值约为灌木林的1/2。有效磷和缓效钾在土壤中富集,损害了土壤质量。

(4) 板栗林的土壤质量劣于灌木林。SQI值最大的5块样地均为灌木林,板栗林SQI的平均值低于灌木林。

参考文献(References)

- [1] 李子君,刘家圆,王海军.北方土石山区坡面水土流失特征研究[J].水土保持研究,2024,31(1):1-9.
Li Zijun, Liu Jiayuan, Wang Haijun. Study on the characteristics of soil and water loss on the slopes in northern rocky mountain area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(1):1-9.
- [2] 孙天妙,曹建生,阳辉,等.北方土石山区水土流失治理现状与展望[J].防护林科技,2022,40(5):56-61.
Sun Tianmiao, Cao Jiansheng, Yang Hui, et al. Current status and prospective of soil erosion control in earth-rock mountain areas of north China [J]. Protection Forest Science and Technology, 2022,40(5):56-61.
- [3] 韩元顺,许林云,周杰.中国板栗产业与市场发展现状及趋势[J].中国果树,2021,63(4):83-88.
Han Yuanshun, Xu Linyun, Zhou Jie. Status and trend of the development of chestnut industry in China [J]. China Fruits, 2021,63(4):83-88.
- [4] 费晓.密云板栗林地水土流失治理措施及其效果研究[D].北京:北京林业大学,2019.
Fei Xiao. Study on soil erosion control measures and effects of chestnut forest in Miyun [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [5] 王季丰.稻田养分流失和经济林水土流失控制技术研究[D].浙江 杭州:浙江大学,2017.
Wang Jifeng. Studies on the techniques for controlling nutrient runoff losses from rice fields and soil erosion from nonwood forests [D]. Hangzhou, Zhejiang: Zhejiang University, 2017.
- [6] 任平,张如,李英梅,等.板栗林下土壤养分状况评价及相关性分析[J].现代农业科技,2024(3):103-106.
Ren Ping, Zhang Ru, Li Yingmei, et al. Evaluation and correlation analysis of soil nutrient status under chestnut forests [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2024(3):103-106.
- [7] 窦志扬.大别山区经济林开发栽培方式对土壤水文物理性能的影响[D].山东 泰安:山东农业大学,2022.
Dou Zhiyang. Effects of economic forest development and cultivation on soil hydrophysical properties in Tapien Mountain area [D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2022.
- [8] 丁新辉,冯筱,田琴,等.燕山山区板栗林地抗蚀抗冲性能及其临界坡长[J].咸阳师范学院学报,2023,38(4):41-45.
Ding Xinhui, Feng Xiao, Tian Qin, et al. Soil erosion resistance of chestnut forest in Yanshan mountainous area and its critical slope length [J]. Journal of Xianyang Normal University, 2023,38(4):41-45.
- [9] 庞梦丽,孙明阳,王明远,等.河北太行山典型水土保持经济林枯落物持水特性[J].水土保持研究,2017,24(6):200-204.
Pang Mengli, Sun Mingyang, Wang Mingyuan, et al. Litter water-holding capacity of economic forests for soil and water conservation in Taihang Mountain of Hebei Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017,24(6):200-204.
- [10] 杨润泽.密云水库周边山区土壤侵蚀与面源污染防治措施研究[D].北京:北京林业大学,2020.
Yang Runze. Study on soil erosion and non-point source pollution control measures in mountainous area around Miyun Reservoir [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [11] Feudis D M, Falsone G, Vianello G, et al. Stable organic carbon pool rises in soil under chestnut (*Castanea sativa* Mill) forest for timber production after 15 years since grafting onto satin-cut stumps [J]. EQA-International Journal of Environmental Quality, 2020, 40:1-10.
- [12] Rhoades C C. The influence of American chestnut (*Castanea dentata*) on nitrogen availability, organic matter and chemistry of silty and sandy loam soils [J]. Pedobiologia, 2007,50(6):553-562.
- [13] Vittori Antisari L, Falsone G, Carbone S, et al. Short-term effects of forest recovery on soil carbon and nutrient availability in an experimental chestnut stand [J]. Biology and Fertility of Soils, 2013,49(2):165-173.
- [14] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准:SL 190—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
Ministry of Water Resources of the People's Republic

- of China. Standards for Classification and Gradation of Soil Erosion: SL 190—2007 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Physical and Chemical Analysis of Soil [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1980.
- [16] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978:511-514.
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Physical and Chemical Analysis of Soil [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1978: 511-514.
- [17] 国家林业局. 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算: LY/T 1237—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
State Forestry Administration of the People's Republic of China. Determination of Organic Matter in Forest Soil and Calculation Carbon-nitrogen Ratio: LY/T 1237—1999 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2000.
- [18] 国家林业局. 森林土壤氮的测定: LY/T 1228—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
State Forestry Administration of the People's Republic of China. Nitrogen Determination Methods of Forest Soils: LY/T 1228—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [19] 李小涵, 董昭芸, 惠晓丽, 等. 氢氧化钠熔融法测定土壤全磷的优化[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(8): 1905-1910.
Li Xiaohan, Dong Zhaoyun, Hui Xiaoli, et al. Optimization of total soil phosphorus determination by sodium hydroxide fusion method [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(8): 1905-1910.
- [20] 中国林业科学研究院林业研究所森林土壤研究室. 森林土壤全钾的测定: LY/T 1234—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
Forest Soil Research Laboratory, Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry. Determination of Total Potassium in Forest Soil: LY/T 1234—1999 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1999.
- [21] 莎娜, 张三粉, 骆洪, 等. 两种土壤碱解氮测定方法的比较[J]. 内蒙古农业科技, 2014, 42(6): 25-26.
Sha Na, Zhang Sanfen, Luo Hong, et al. Comparison two kinds of determination method of soil alkaline hydrolysis nitrogen [J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2014, 42(6): 25-26.
- [22] 程乐明, 陈良, 刘建雷, 等. 碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定土壤有效磷的注意事项[J]. 现代农业科技, 2009, 38(3): 205.
Cheng Leming, Chen Liang, Liu Jianlei, et al. Precautions for the determination of available phosphorus in soil by sodium bicarbonate extraction-molybdenum-antimony colorimetric assay [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2009, 38(3): 205.
- [23] 中华人民共和国农业部. 土壤速效钾和缓效钾含量的测定: NY/T 889—2004[S]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Determination of Exchangeable Potassium and Non-exchangeable Potassium Content in Soil: NY/T 889—2004 [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [24] He Q, Walling D E. The distribution of fallout ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb in undisturbed and cultivated soils [J]. Applied Radiation and Isotopes, 1997, 48(5): 677-690.
- [25] 冯嘉仪, 储双双, 王婧, 等. 华南地区5种典型林分类型土壤肥力综合评价[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(3): 73-81.
Feng Jiayi, Chu Shuangshuang, Wang Jing, et al. Comprehensive evaluation of soil fertility of five typical forest stands in south China [J]. Journal of South China Agricultural University, 2018, 39(3): 73-81.
- [26] 农业农村部全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国版社, 1998.
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Chinese Soil [M]. Beijing: China Publishing Group, 1998.
- [27] 中华人民共和国国土资源部. 土地质量地球化学评价规范: DZ/T 0295—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Determination of land Quality Geochemical Evaluation: DZ/T 0295—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [28] 李富. 燕山板栗园地下管理技术[J]. 现代农村科技, 2015, 44(8): 45-46.
Li Fu. Underground management techniques for Yanshan chestnut orchards [J]. Modern Rural Technology, 2015, 44(8): 45-46.
- [29] 钱婧. 模拟降雨条件下红壤坡面菜地侵蚀产沙及土壤养分流失特征研究[D]. 浙江 杭州: 浙江大学, 2015.
Qian Jing. Research on eroded sediment yield and nutrient loss characteristics from sloping vegetable fields of red soils under artificial simulation of rainfall [D]. Hangzhou, Zhejiang: Zhejiang University, 2015.
- [30] 张燕, 杨浩, 金峰, 等. 宜兴茶园土壤侵蚀及生态影响[J]. 土壤学报, 2003, 56(6): 815-821.
Zhang Yan, Yang Hao, Jin Feng, et al. Soil erosion and its ecological impacts in Yixing tea plantation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 56(6): 815-821.