

质量指数表征模拟降雨下土壤坡面养分的流失特性^①

郭新送^{1,3}, 丁方军^{1,2,3*}, 宋付朋^{1,2}, 陈士更^{1,3}, 葛雨明³

(1 土壤资源高效利用国家工程实验室, 山东泰安 271018; 2 山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271018;

3 山东省腐植酸高效利用工程技术研究中心, 山东农大肥业科技有限公司, 山东泰安 271000)

摘 要: 通过室内自动模拟降雨系统, 设置模拟降雨试验, 运用土壤单质量指数(SSQI)和土壤综合质量指数(SSCI), 研究了模拟降雨对 3 种类型土壤(棕壤、褐土与红壤)坡面养分流失及土壤质量变化的影响。结果显示: 降雨造成了 3 种类型土壤坡面不同程度的氮素流失, 土壤全氮指数均有所降低, 并以坡下部降低最多; 表下层坡面土壤全氮指数以棕壤降低最多, 分别为褐土的 1.33 倍和 1.79 倍、红壤的 9.28 倍和 3.45 倍。降雨均提高了 3 种类型土壤坡面有效磷的含量, 有效磷指数除棕壤下层坡面降低了 3.98% 外, 其余土壤坡面升高了 4.00%~47.73%, 并以红壤表下层坡面的升高幅度最大。模拟降雨下, 土壤速效钾含量变化受土壤类型影响较大, 3 种类型土壤中, 红壤坡面的速效钾指数有较大幅度升高, 褐土坡面降雨前后基本持平, 而棕壤坡面有小幅降低。模拟降雨后, 棕壤与褐土表下层坡面综合指数分别降低了 33.62%、35.34% 与 22.53%、11.73%, 而红壤反而升高了 18.93% 与 7.00%。

关键词: 质量指数; 模拟降雨; 土壤类型; 养分流失

中图分类号: S153; S156.4

近年来, 因降雨造成的养分流失、土壤质量下降等问题成为国内外学者共同关注的热点问题之一。降雨条件下, 土壤质量下降是指土壤养分流失, 而土壤养分流失是一个复杂的物理化学过程, 涉及的影响因素众多, 如降雨强度、土壤类型、坡面幅度等^[1-2]。国内外研究一致表明, 降雨条件下的土壤养分损失主要有两个途径, 一是土壤养分的淋失, 即养分随土壤下渗水迁移进入水体; 二是土壤养分流失, 即养分随地表径流和土粒移动, 迁出耕地, 进入河流水域的自然输出^[3-6]。针对降雨下, 土壤养分流失规律及其影响因素的研究已有较多报道^[7-9], 而降雨条件下, 对养分损失与潜在养分的活化和释放结合起来的研究未见报道, 这就使全面评估降雨对农田养分损失及土壤质量的变化受到限制。土壤质量指数是一种表征土壤养分含量变化, 评价土壤质量的重要方法。如今以土壤质量指数的形式进行土壤质量评价与管理越来越普遍, 其包括单质量指数和综合质量指数^[10]。单质量指数最大特点就是等价性, 可将某一养分进行标准化后与其评价标准进行对比, 从而获得此养分的丰缺级别; 而综合质量指数则是根据各养分评价标准,

建立土壤质量评价函数, 估算整个土壤质量, 其能突出土壤属性因子中最差因子对土壤质量的影响^[11]。

在降雨过程中, 土壤氮、磷、钾养分较易随着降雨损失, 但一些养分在损失的同时还会出现一些活化和释放, 如红壤有效磷含量在降雨后较降雨前有所升高^[12], 故单一养分的升高或降低不能代表土壤综合质量的变化。为明确降雨前后土壤单一养分指标及土壤综合养分指标的变化趋势, 本研究通过模拟降雨试验, 采用单质量指数和综合质量指数法表征降雨对棕壤、褐土和红壤 3 种类型土壤坡面养分的影响, 旨在揭示相同降雨条件下不同类型土壤坡地养分及土壤质量的变化规律, 为防治农田坡地土壤养分流失提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 模拟降雨试验设计

模拟降雨试验于 2013 年在山东省土壤侵蚀与生态修复重点实验室降雨大厅进行, 降雨采用自动模拟降雨系统, 设置降雨高度为 20 m, 降雨强度恒定为 72 mm/h, 模拟降雨历时 90 min/次, 降雨均匀度大于

①基金项目: 山东省自主创新专项(2014ZZCX07302)和山东省科技发展计划项目(2013GNC21101)资助。

* 通讯作者(dfj401@163.com)

作者简介: 郭新送(1987—), 男, 山东新泰人, 硕士, 工程师, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: guoxinsong1028@163.com

80%，雨滴降落终速可达到自然雨滴的 98% 以上，降雨特性接近于天然降雨。模拟降雨共 9 次，以接近于土壤采集区的年均降雨量范围。

1.2 供试土壤

3 种类型土壤分别为棕壤、褐土和红壤，其中棕壤采自山东省泰安市普照寺附近，系统分类为普通简

育湿润淋溶土；褐土采自山东农业大学黄淮海玉米种植中心，系统分类为普通简育干润淋溶土；红壤采自江西鹰潭中国科学院红壤生态试验站，系统分类为普通黏化湿润富铁土。所取的试验土样均为 0 ~ 20 cm 的农田耕层土壤，经过风干后过 4 mm 筛，除去石块、植物根茬等混匀备用。其基本养分指标如表 1 所示。

表 1 3 种类型土壤养分及质量指数
Table 1 Soil nutrients and quality indices of three tested soil types

土壤类型	全氮		有效磷		速效钾		综合质量指数
	含量(g/kg)	质量指数	含量(mg/kg)	质量指数	含量(mg/kg)	质量指数	
棕壤	1.09	2.18	8.82	1.76	80.56	1.61	1.16
褐土	1.28	2.56	5.00	1.00	143.97	2.55	1.08
红壤	0.45	0.60	8.80	1.76	139.27	2.49	0.81

1.3 试验装置

试验基本装置为自行设计的木制土槽，用于盛放土样，其长、宽、高依次分别为 200、50、28 cm。供试 3 种类型土壤均设置 3 个重复，土样按照体积质量(容重)1.25 g/cm³ 进行装槽，土槽底部预先铺设 5 cm 厚洗净细沙，所装土样的有效高度定为 20 cm，土壤平均初始质量含水量控制在(22±2)%，装填完毕后用塑料薄膜覆盖防止土壤水分蒸发。试验土槽坡度设为 7°。

模拟降雨结束后，在每个槽内的沿坡面方位 17 条等分线和垂直坡面方位 5 条等分线交点处用小型土钻 10 cm/层取土，取土两层(表层为 0 ~ 10 cm，下层为 10 ~ 20 cm)，每个坡面共 85 个点，计 170 个样品。土样经风干、磨细、过筛备用。

1.4 测定项目与分析方法

土壤全氮采用浓硫酸-催化剂消煮，凯氏法测定；有效磷采用钼蓝比色法，紫外分光光度计测定；速效钾采用 NH₄OAC 浸提，火焰光度计法测定。具体方法参考鲍士旦(2000)版《土壤农化分析》^[13]。

1.5 数据处理与分析

1.5.1 土壤质量指标分级标准 参考曹志洪和周

健民^[14]、Li 等^[15]、单奇华等^[16]和阚文杰和吴后堂^[17]的研究结果，确定土壤全氮、有效磷、速效钾的质量指标分级标准(表 2)。

表 2 土壤质量指标分级标准
Table 2 Gradation standard of indicators for soil quality assessment

土壤指标	$X_{\min}$	X_{mid}	$X_{\max}$	X_o
全氮(g/kg)	0.75	1	1.5	>1.5
有效磷(mg/kg)	5	10	20	>20
速效钾(mg/kg)	50	100	180	>150

注： $X_{\min}$ 、 X_{mid} 、 $X_{\max}$ 、 X_o 分别为指标标准化下限、中值、上限和最优区间。

1.5.2 土壤单质量指数(SSQI)计算 土壤单质量指数是依据土壤指标与植物生长的关系，将土壤单个养分指标按照其相应的标准化公式进行标准化。土壤单质量指数最大特点就是等价性，便于对比，计算简单，能较直观明确地指出各检测养分的丰缺级别及排序。在标准化过程中，养分指标与植物生长的关系曲线通常主要分为两种类型：“S”形、反“S”形^[13]。满足“S”形、反“S”形标准化的公式如表 3。

表 3 土壤质量指数标准化计算公式
Table 3 Standardized formula of soil quality index

满足“S”形曲线的指标标准化公式			满足反“S”形曲线的指标标准化公式		
条件	公式	编号	条件	公式	编号
$C_i \leq X_{\min}$	$Pi = C_i / X_{\min}$	(1)	$C_i \geq X_{\max}$	$Pi = X_{\max} / C_i$	(5)
$X_{\min} < C_i \leq X_{\text{mid}}$	$Pi = 1 + (C_i - X_{\min}) / (X_{\text{mid}} - X_{\min})$	(2)	$X_{\text{mid}} \leq C_i < X_{\max}$	$Pi = 1 + (X_{\max} - C_i) / (X_{\max} - X_{\text{mid}})$	(6)
$X_{\text{mid}} < C_i \leq X_{\max}$	$Pi = 2 + (C_i - X_{\text{mid}}) / (X_{\max} - X_{\text{mid}})$	(3)	$X_{\min} \leq C_i < X_{\text{mid}}$	$Pi = 2 + (X_{\text{mid}} - C_i) / (X_{\text{mid}} - X_{\min})$	(7)
$C_i \geq X_{\max}$	$Pi = 3$	(4)	$C_i \leq X_{\min}$	$Pi = 3$	(8)

注： Pi 为土壤单质量指数(SSQI)； C_i 为指标实测值； X 为指标分级标准(表 2)。最优区间左侧指标的标准化适用“S”形曲线的式(1)、式(2)和式(3)，最优区间右侧指标的标准化适用反“S”形曲线的式(5)、式(6)和式(7)。本研究中全氮、有效磷、速效钾养分指标可归为“S”形曲线，适用式(1)、式(2)、式(3)和式(4)进行标准化。

1.5.3 土壤综合量指数(SCQI)计算 土壤综合质量指数(SCQI)是指在给定的生态系统内,通过每一种元素的评价标准,建立土壤质量评价函数,然后估计整个土壤质量。综合质量指数在减少评价土壤质量主观因素影响的同时,能突出土壤属性因子中最差因子对土壤质量的影响,该评价方法反映了生态学中作物生长的最小因子定律,也提高了评价结果的可信度。计算方法采用改进的内梅罗(Nemoro)综合指数法进行计算^[16-18],土壤综合质量指数的计算公式:

$$Q = \sqrt{\frac{(\overline{pi})^2 + (pi_{\min})^2}{2} \times \frac{n-1}{n}} \quad (9)$$

式中: Q 为土壤质量指数; $\overline{pi}$ 为土壤养分单质量指数的平均值; $pi_{\min}$ 为土壤养分单质量指数最小值; n 为养分个数。

本研究中,先对模拟降雨后土壤全氮、有效磷及速效钾($n=3$)3个养分进行标准化,标准化后即为其养分的单质量指数,与模拟降雨前的单质量指数进行比较,若某养分质量指数下降,表明该养分在降雨过程存在一定程度流失,且下降幅度越大,其流失程度越大;若较降雨前升高,表明降雨可活化无效养分或促进土壤固定养分的释放。将获得的模拟降雨后土壤养分单质量指数平均值与最小值按照土壤综合质量评价函数计算得到土壤综合质量指数,与模拟降雨前土壤综合质量指数进行比较,若土壤综合质量指数较模拟降雨前下降,表明降雨造成土壤养分综合流失,下

降幅度越大,即流失程度越大;若较降雨前升高,表明降雨对土壤综合养分具有一定提升作用,但具体是哪一土壤养分含量升高要结合土壤单质量指数分析。

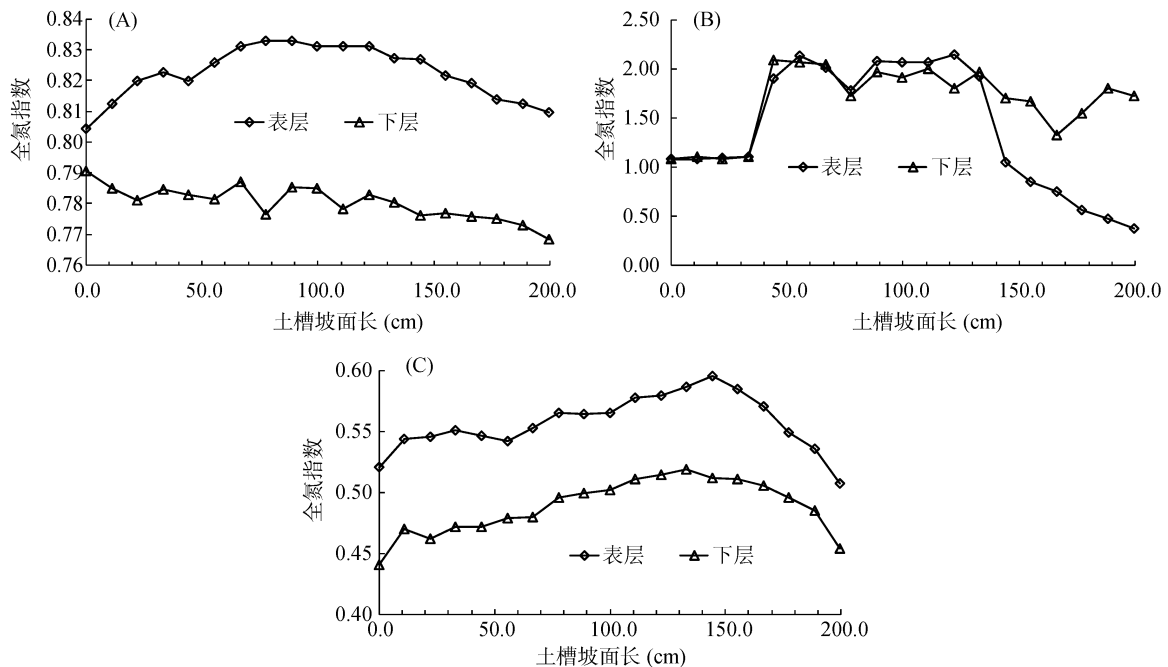
文中数据处理采用 Excel、SAS 软件进行。

2 结果与分析

2.1 单质量指数法表征模拟降雨对土壤坡面养分的影响

2.1.1 全氮 降雨是造成坡面氮素流失的主要因素之一。模拟降雨后,棕壤表层坡面坡上、坡中和坡下部的全氮指数分别变为 0.82 ± 0.02 、 0.83 ± 0.01 和 0.82 ± 0.02 ,沿坡面向下均整体呈现先升高后降低趋势(图 1A);下层坡面坡上、坡中和坡下部的全氮指数分别变为 0.79 ± 0.01 、 0.78 ± 0.01 和 0.77 ± 0.01 ,沿坡面向下均整体呈现逐渐降低趋势。整个棕壤坡面的全氮指数变为降雨前的 38.24%,其中表层与下层的全氮指数分别比模拟降雨前降低了 61.93% 和 63.21%,全氮指数显著降低,即降雨造成了棕壤坡面氮素的严重流失。

模拟降雨后,整个褐土坡面的平均全氮指数变为降雨前的 59.76%,降雨造成的褐土坡面氮素流失严重。整个表层坡面全氮指数变为 1.26 ± 0.89 ,比模拟降雨前降低了 46.70%,沿坡面向下全氮指数大体呈先升高后降低趋势,以坡上部(尤以 0 ~ 40 cm 坡位)和坡下部(尤以 150 ~ 200 cm 坡位)的全氮指数较小



(图 A、B、C 分别代表棕壤、褐土、红壤,下同)

图 1 模拟降雨后土壤坡面全氮的质量指数

Fig. 1 Soil TN indices of soil slopes after simulated rainfall (same as flows)

(图 1B)；下层坡面全氮指数变为模拟降雨前的 64.72%，全氮指数变化幅度在 1.08 ~ 2.08，其变化趋势同表层坡面，也以坡上部 and 坡下部的全氮指数较小。相对于下层坡面，表层氮素流失受降雨影响程度较大，全氮指数低于下层坡面 16.77%。

模拟降雨后，整个红壤坡面的平均全氮指数变为降雨前的 87.50%，全氮总量有小幅降低。表层坡面的全氮指数变为 0.55 ± 0.05 ，比模拟降雨前降低了 6.67%，沿坡面向下全氮指数呈现先升高后降低的趋势(图 1C)；下层坡面的全氮指数变为模拟降雨前的 81.67%，全氮指数变化幅度在 0.44 ~ 0.52，其变化趋势与表层坡面相似。相对于下层坡面，表层氮素流失受降雨影响程度较大，全氮指数比下层坡面降低 0.01 ~ 0.16。

模拟降雨造成了 3 种类型土壤坡面不同程度的氮素流失，从 3 种类型土壤的全氮指数指标来看，模拟降雨后，棕壤坡面的全氮指数降低最多，褐土次之，

红壤最少，也即 3 种类型土壤坡面的氮素流失量为棕壤坡面 > 褐土坡面 > 红壤坡面。

2.1.2 有效磷 降雨会引起坡面土壤有效磷含量的变化。模拟降雨后，棕壤表层坡面有效磷指数升高了 11.93%，并沿坡面向下呈先升高后降低趋势(图 2A)；而下层坡面有效磷指数小幅降低(有效磷指数变为模拟降雨前的 96.02%)，沿坡面向下有效磷指数呈先逐渐升高趋势。整个棕壤坡面的有效磷指数变为模拟降雨前的 103.98%，稍高于模拟降雨前，即降雨会在一定程度上增加棕壤坡面土壤有效磷的含量。

模拟降雨后，褐土表层坡面有效磷指数有小幅升高，较模拟降雨前升高了 4.00%，沿坡面向下有效磷指数呈先升高后降低趋势(图 2B)；下层坡面基本持平，但坡上部(0 ~ 40 cm 坡位)的有效磷指数较模拟降雨前有较大幅度的降低。整个褐土坡面的有效磷指数稍高于模拟降雨前，比模拟降雨前升高了 2.00%，即降雨也会小幅提高褐土坡面有效磷的含量。

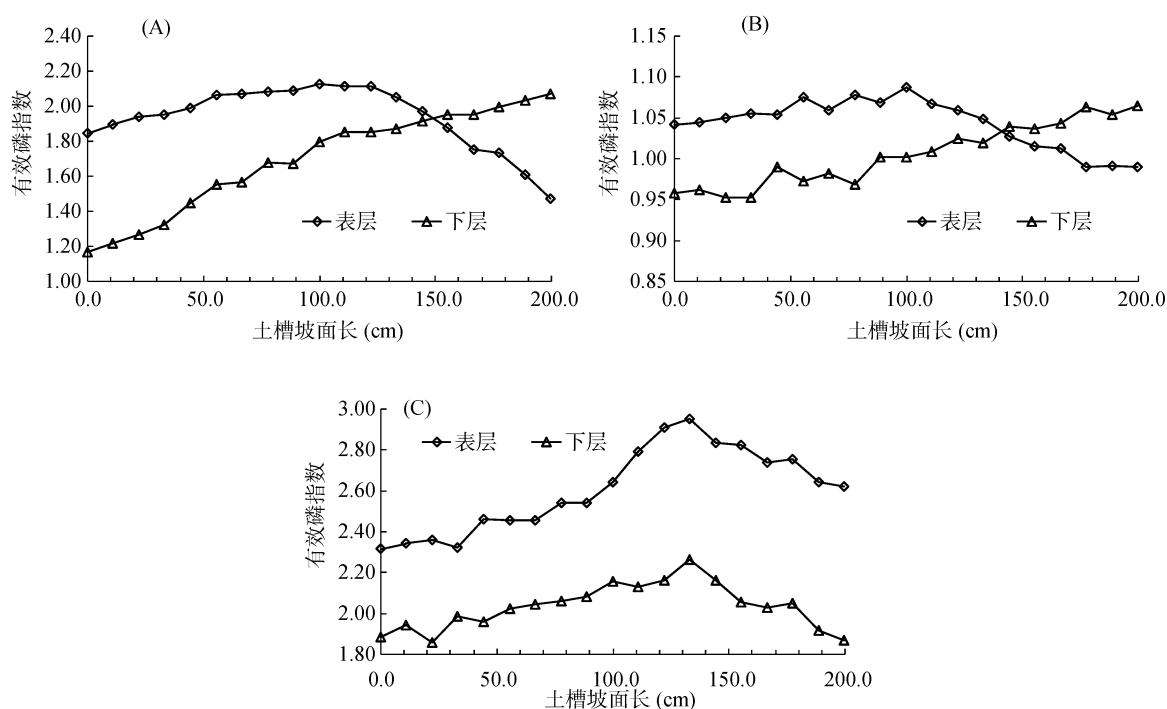


图 2 模拟降雨后土壤坡面有效磷的质量指数

Fig. 2 Soil available P indices of soil slopes after simulated rainfall

模拟降雨后，红壤坡面的有效磷指数比模拟降雨前有较大幅度升高，平均高出模拟降雨前 32.10%。其中表层坡面的有效磷指数升高了 47.73%，沿坡面向下有效磷指数呈先升高后降低趋势(图 2C)；下层坡面的有效磷指数升高了 16.48%，沿坡面向下有效磷指数的变化趋势与表层坡面基本一致。表明降雨能显著提高红壤坡面有效磷的含量，并以表层坡面的提高幅度大于下层坡面。

模拟降雨均会提高 3 种类型土壤坡面有效磷的含量，从 3 种类型土壤的有效磷指数指标来看，模拟降雨后，红壤坡面的有效磷指数升高最大，棕壤次之，褐土最小，也即 3 种类型土壤坡面的磷素增加量为红壤坡面 > 棕壤坡面 > 褐土坡面，这是由于红壤富含铁铝氧化物并与有效态磷结合形成闭蓄态磷，而在降雨作用下经过雨滴冲刷和水淹后闭蓄态磷又大量转化为有效态磷。3 种类型土壤有效磷指数在不同坡位的

变化趋势不同表明,降雨过程中存在有效磷的流失与淋溶,且不同类型土壤的有效磷损失情况不同。

2.1.3 速效钾 降雨会引起坡面土壤速效钾含量的变化,并能改变速效钾在坡面不同坡位的分布状况。模拟降雨后,整个棕壤坡面的速效钾指数变为降雨前的 97.52%,较模拟降雨前有小幅度降低。其中表层坡面速效钾指数比模拟降雨前降低了 8.70%,速效钾含量有小幅度减少,沿坡面向下速效钾指数整体大致呈现逐渐降低趋势(图 3A);而下层坡面的速效钾指数变为模拟降雨前的 103.73%,速效钾含量有小幅度升高,沿坡面向下速效钾指数大体呈现逐渐升高的趋

势。表明降雨能导致棕壤表层坡面速效钾含量的减少和下层坡面速效钾含量的小幅提升,且减少幅度大于提升幅度。

模拟降雨后,褐土表层坡面速效钾指数比模拟降雨前降低了 0.78%,速效钾含量有小幅度减少,沿坡面向下速效钾指数大致呈现先降低后升高趋势(图 3B);下层坡面的速效钾指数变为模拟降雨前的 101.18%,速效钾含量有小幅度升高,沿坡面向下速效钾指数大体呈现与表层互补的变化趋势。整个褐土坡面的平均速效钾指数变为 2.56,基本与降雨前(2.55)持平,即降雨条对褐土坡面速效钾含量影响程度较小。

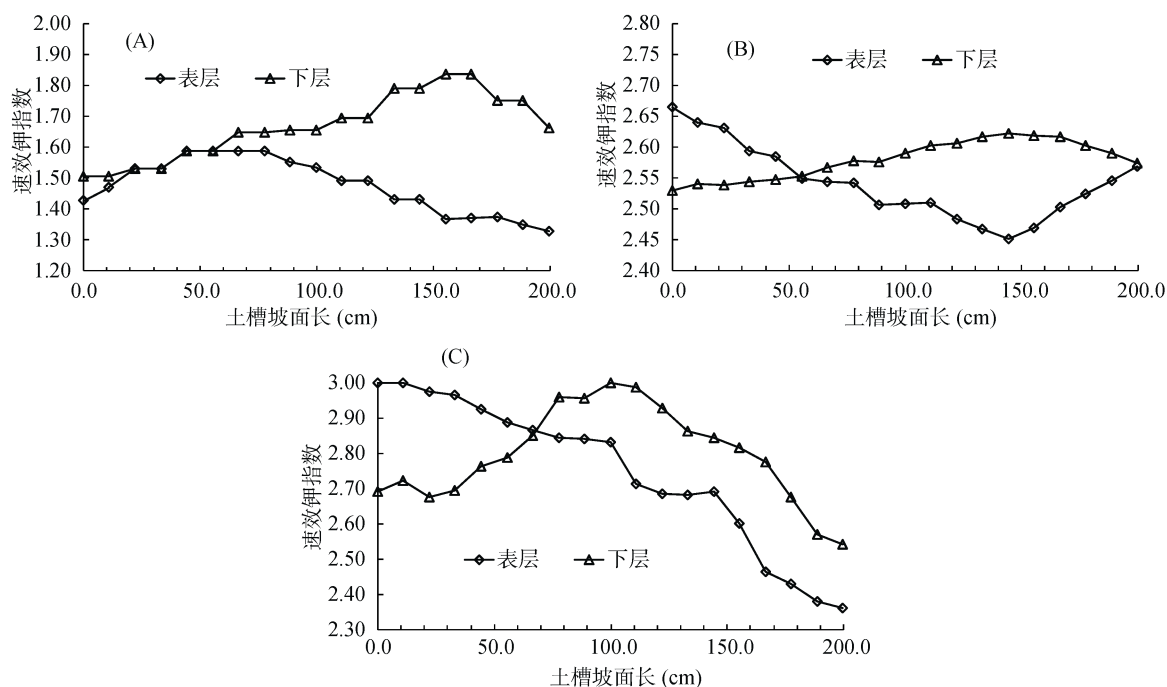


图 3 模拟降雨后土壤坡面速效钾的质量指数

Fig. 3 Soilavailable K indices of soil slopes after simulated rainfall

模拟降雨后,整个红壤坡面的速效钾指数升高了 11.24%。表层坡面速效钾指数比模拟降雨前升高了 10.44%,速效钾含量有较大幅度升高,沿坡面向下速效钾指数呈现逐渐降低趋势(图 3C);下层坡面的速效钾指数变为模拟降雨前的 112.05%,速效钾含量也有较大幅度升高,沿坡面向下速效钾指数呈先升高后降低的趋势,并在 100 cm 坡位达到峰值。与表层坡面相比,下层坡面速效钾指数升高幅度较大。

从 3 种类型土壤的速效钾指数指标来看,模拟降雨后,红壤坡面的速效钾指数有较大幅度升高,褐土坡面降雨前后基本持平,棕壤坡面有小幅度降低,3 种类型土壤坡面的钾素增量为红壤坡面>褐土坡面>棕壤坡面,这是由于土壤的干湿交替能够提高土壤速效钾的含量,雨水能促进矿物钾的释放,而降雨造成的

泥沙流会引起土壤速效钾损失,加之土壤类型不同,故速效钾指数出现各异的变化。

2.2 综合质量指数法表征模拟降雨对土壤坡面养分的影响

2.2.1 表层坡面养分 模拟降雨下,采用单质量指数法可明确表征一种养分在降雨前后的变化规律,但某一养分均不能代表土壤的整体质量状况,故对整个坡面的总体养分质量情况还需通过综合质量指数进行评价。

模拟降雨后,棕壤表层坡面坡上、坡中和坡下部的综合指数分别变为降雨前的 63.79%~69.83%、67.27%~69.94% 和 58.62%~66.40%;褐土表层坡面分别变为 54.63%~96.30%、91.67%~95.37% 和 59.26%~79.63%;红壤表层坡面分别变为 117.28%~

119.75%、119.78%~125.93% 和 109.88%~123.46%。
3 种类型土壤表层坡面综合指数沿坡面向下均呈现先升高后降低趋势(图 4)。

与模拟降雨前相比,棕壤与褐土整个表层坡面综合指数降低了 33.62% 和 22.53%,其中褐土在 0~40 cm 坡位的综合指数极低,而红壤升高了 18.93%。表明降雨在一定程度上降低了棕壤与褐土表层坡面的养分总量,造成了坡面养分的流失;而对红壤,降雨却提高了红壤表层坡面的土壤质量,有效磷和速效钾总量较降雨前有所升高。

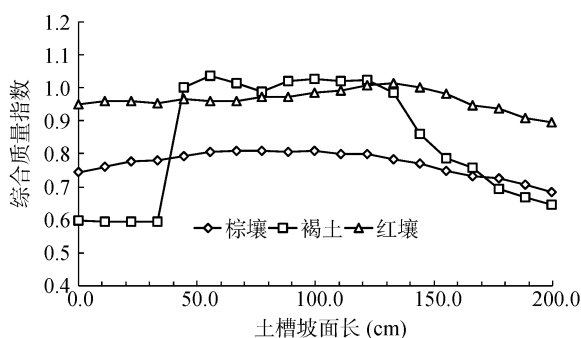


图 4 模拟降雨后 3 种类型土壤表层坡面养分的综合质量指数

Fig. 4 SCQI of surface slopes of three tested soil types after simulated rainfall

2.2.2 下层坡面养分 模拟降雨后,棕壤下层坡面坡上、坡中和坡下部的综合指数分别比降雨前降低了 37.07%~58.00%、31.90%~36.21% 和 31.03%~31.90%,沿坡面向下呈逐渐升高趋势;褐土下层坡面坡上、坡中及坡下部的综合指数分别比降雨前降低了 7.41%~21.30%、7.37%~12.04% 和 8.33%~17.28%,而红壤下层坡面坡上、坡中及坡下部的综合指数分别比降雨前升高了 0.10%~7.41%、11.11%~13.58%及 3.93%~11.11%,褐土与红壤下层坡面综合指数沿坡面向下均呈现先升高后降低趋势(图 5)。

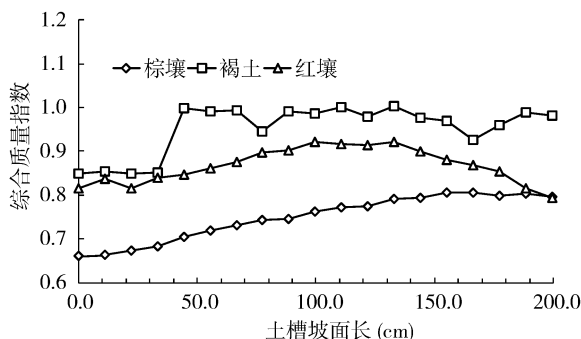


图 5 模拟降雨后 3 种类型土壤下层坡面养分的综合质量指数

Fig. 5 SCQI of lower slopes of three soil types after simulated rainfall

与模拟降雨前相比,棕壤与褐土整个下层坡面综合指数降低了 35.34% 和 11.73%,而红壤升高了 7.00%,即降雨在一定程度上也造成了棕壤与褐土下层坡面的养分流失,降低了土壤质量,且以降雨对棕壤的影响较大;相对于棕壤与褐土,降雨反而提高了红壤下层坡面的土壤质量,其中以提高土壤有效磷总量为主。

3 结论

1) 模拟降雨下,3 种类型土壤坡面全氮指数均有所降低,并以坡下部全氮指数降低最多,氮素流失严重。3 种类型土壤中,棕壤坡面全氮指数降低最多,分别为褐土和红壤的 1.56 倍和 6.37 倍。

2) 降雨不仅造成土壤有效磷的淋溶与流失,同时还引起其活化与释放,除棕壤下层坡面有效磷指数降低 3.98% 外,其余土壤坡面升高 4.00%~47.73%,并以红壤表下层坡面升高幅度最大。

3) 模拟降雨下,土壤速效钾含量受土壤类型影响较大。3 种类型土壤中,红壤坡面的速效钾指数有较大幅度升高,褐土坡面降雨前后基本持平,而棕壤坡面有小幅降低。

4) 与模拟降雨前相比,棕壤与褐土表下层坡面综合指数分别降低了 33.62%、35.34% 与 22.53%、11.73%,而红壤反而升高了 18.93% 与 7.00%,即棕壤土壤质量因降雨下降最严重,褐土次之,红壤因降雨而使土壤质量提升,但应重视氮素的流失。

参考文献：

- [1] 王辉,王全九,邵明安. PAM 对黄土坡地水分养分迁移特性影响的室内模拟实验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 85-88
- [2] 王辉,王全九,邵明安. 人工降雨条件下黄土坡面养分随径流迁移试验[J]. 水土保持学报, 2006, 22(6): 39-43
- [3] Havis R N, Alberts E E. Nutrient leaching from field-decomposed corn and soybean residue under simulated rainfall[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 6: 211-218
- [4] Torstensson G, Aronsson H. Nitrogen leaching and crop availability in manured catch crop system in Sweden[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, 56: 139-152
- [5] 陈志良,程炯,刘平,等. 暴雨径流对流域不同土地利用土壤氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 30-33
- [6] 孙佳美,余新晓,樊登星. 模拟降雨条件下黑麦草对土壤水分入渗的影响[J]. 土壤, 2014, 46(6): 1115-1120
- [7] 吕玉娟,彭新华,高磊,等. 红壤丘陵岗地区坡地地表径流氮磷流失特征研究[J]. 土壤, 2015, 47(2): 297-304
- [8] 谭德水,江丽华,谭淑樱,等. 湖区小麦-玉米轮作模式不同施肥措施调控氮磷养分流失研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 128-137

- [9] 纪雄辉, 郑圣先, 鲁艳红, 等. 施用尿素和控释氮肥的双季稻田表层水氮素动态及其径流损失规律[J]. 中国农业科学, 2006, 39(12): 2 521–2 530
- [10] 曹志洪, 周健民. 中国土壤质量[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 45–52
- [11] 郭新送, 宋付朋, 高杨, 等. 模拟降雨对 3 种类型土壤氮、磷素空间分布及其颗粒组成的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 41–45
- [12] Wagenet R J, Hutson J S. Soil quality and its dependence and dynamic physical processes[J]. J. Environ. Qual., 1997, 26(1): 41–48
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 49–52, 263–268
- [14] 曹志洪, 周健民. 中国土壤质量[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 45–52
- [15] Li J L, Li W F, Yang X P, et al. The impact of land use change on quality evolution of soil genetic layer on the coastal plain of south Hangzhou [J]. Bay. J. GeogrSci, 2008, 18(4): 469–482
- [16] 单奇华, 俞元春, 张建锋, 等. 城市森林土壤肥力质量综合评价[J]. 水土保持通报, 2009, 29(4): 186–190
- [17] 阚文杰, 吴启堂. 一个定量综合评价土壤肥力的方法初探[J]. 土壤通报, 1994, 25(6): 245–247
- [18] 赵彦锋, 程道全, 陈杰, 等. 耕地地力评价指标体系构建中的问题与分析逻辑. 2015-07-09. <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1119.p.20150709.1059.005.html>.

Quality Indices on Nutrient Loss Characteristics of Soil Slope Under Simulated Rainfall

GUO Xinsong^{1,3}, DING Fangjun^{1,2,3*}, SONG Fupeng^{1,2}, CHEN Shigeng^{1,3}, GE Yuming³

(1 National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Taian, Shandong 271018, China; 2 College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China; 3 Engineering Technology Research Center of Shandong Province, Efficient Utilization of Humic Acid, Shandong Agricultural University, Fertilizer Science Tech. Co. Ltd., Taian, Shandong 271000, China)

Abstract: The nutrient loss characteristics of three soils (brown soil, cinnamon soil and red soil) were studied by using indoor automatic rainfall simulation system, soil single quality index (SSQI) and soil comprehensive quality index(SCQI).The results showed that the simulated rainfall caused the different loss levels of nitrogen on all three tested soil slopes, total nitrogen index all decreased, and decreased most at all the bottom slopes; total nitrogen indices on both surface and lower slope reduced most in brown soil, which was 1.33 times and 1.79 times of cinnamon soil, 9.28 times and 3.45 times of red soil, respectively. The available phosphorus content was increased by simulated rainfall, except brown soil's available phosphorus index reduced by 3.98%, the available phosphorus index on other soils' slopes increased from 4.00% to 47.73%, increased most in the surface lower slope of red soil. Under simulated rainfall, rapidly available potassium index of red soil increased significantly, that of cinnamon soil changed little, and that of brown soil decreased slightly. After simulated rainfall, surface and lower slope comprehensive indices of brown soil and cinnamon soil were reduced by 33.62%, 35.34% and 22.53%, 33.62%, respectively, while that of red soil increased by 18.93% and 7.00%.

Key words: Quality index; Simulated rainfall; Soil types; Nutrient loss