

# 东北黑土区土壤侵蚀自然驱动因子时空分布特征

季晓琪, 范昊明

(沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110866)

**摘 要:** [目的] 东北黑土区复合营力带来的土壤侵蚀作用明显, 研究东北黑土区不同典型区间的土壤复合侵蚀自然驱动因子年内交替叠加情况, 对于区域内土壤侵蚀治理具备现实意义。[方法] 针对东北黑土区 11 个典型区域, 利用气象及遥感等数据, 通过分析对比不同区域水、风、冻、融作用自然驱动因子时空分布特征, 阐明了各因子交替与叠加特点。[结果] 在时间上, 东北黑土区年内水力、风力、冻融、融雪作用驱动因子叠加交替出现, 春季风力、冻融、融雪作用最为复杂, 夏季以水力作用为主, 秋季水力、风力、冻融复合作用有限, 冬季风力、冻结作用明显。在空间上, 水力驱动作用由东南向西北逐渐减小, 风力作用由西南向东北逐渐减小, 冻融作用由西南向东北逐渐减小, 融雪作用呈现由西北向东南逐渐减小的趋势。根据侵蚀驱动因子分异特征将全区划分为水力、水力—融雪、水力—风力—冻融、水力—风力—融雪、水力—冻融—融雪侵蚀作用区。[结论] 各营力表现出明显的时、空作用分异特点, 根据自然驱动因子年内交替叠加情况得出了复合侵蚀驱动因子年内时空分布特征, 为不同区域针对性土壤侵蚀治理、深化研究区复合侵蚀防控提供参考。

**关键词:** 复合侵蚀驱动因子; 时空分异; 叠加作用机制; 东北黑土区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0130-09

## Spatiotemporal Distribution of Natural Driving Factors of Soil Erosion in Northeast Mollisol Region

Ji Xiaoqi, Fan Haoming

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** [Objective] Soil erosion caused by compound forces is obvious in Mollisol region, studying the annual alternating superposition of natural driving factors for soil composite erosion in different typical intervals in Northeast Mollisol Region has practical significance for soil erosion control in the region. [Methods] We analyzed and compared the spatiotemporal distribution of natural driving factors of water, wind, freeze-thaw, and snowmelt in 11 typical regions of the region, and clarified the alternative and superposition characteristics of each factor. [Results] In terms of time, the driving factors of hydraulic power, wind power, freeze-thaw and snowmelt in northeast Mollisol region occurred in superposition and alternation within the year. In spring, the driving factors of wind power, freeze-thaw and snowmelt were the most complex. In Summer, the driving factors of hydraulic power, wind power and freeze-thaw were the main driving factors. In autumn, the combined effects of hydraulic power, wind power and freezing and thawing were limited, while in winter, the effects of wind power and freezing were obvious. In terms of space, the hydraulic driving effect gradually decreased from southeast to northwest. Wind effect gradually decreased from southwest to northeast. The freeze-thaw effect gradually decreased from southwest to northeast. Snowmelt gradually decreased from northwest to southeast. According to the different

收稿日期: 2023-08-30

修回日期: 2023-10-16

资助项目: 国家重点研发计划(2021YFD1500701); 国家自然科学基金项目(41371272)

第一作者: 季晓琪(2000—), 女, 辽宁朝阳人, 在读硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀规律。E-mail: 2021220046@stu.syau.edu.cn

通信作者: 范昊明(1972—), 男, 吉林白山人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀规律、流域水沙等研究。E-mail: fanhaoming@163.com

<http://stbcj.paperonce.org>

characteristics of erosion driving factors, the whole region was divided into hydraulic, water-wind-freeze-thaw, water-wind-snow melt, water-freeze-thaw-snow melt erosion zones, and targeted soil erosion control could be carried out in different regions. [Conclusion] Each camp showed obvious temporal and spatial differences in their erosion performance. The characteristics of the composite erosion driving factors in a year were obtained based on the alternating superposition of natural driving factors within a year, providing reference for targeted soil erosion control and in-depth research on the composite erosion prevention and control in different regions.

**Keywords:** composite erosion driving factors; spatiotemporal differentiation; superimposed mechanism; Mollisol region

受独特地形及气候等条件影响,东北黑土区主要存在风力、水力、融雪、冻融侵蚀等侵蚀形式,目前已有研究描述了东北黑土区地区自然驱动因子在不同尺度上土壤侵蚀时空分布特征:时间尺度上水、风、冻、融作用在年内交替叠加出现,空间尺度上与地形地貌、气候条件等有较大关联,表现为多种侵蚀并存,且相互交替叠加作用,加剧了坡面土壤侵蚀的严重程度<sup>[1]</sup>。目前土壤侵蚀研究通常针对单一作用力,较少考虑多种侵蚀形式共同作用对侵蚀结果带来的影响,但也有部分学者对于复合侵蚀研究进行了一定的探索。国内外有关复合土壤侵蚀的研究大多集中在风力、水力、冻融、融雪的两相复合侵蚀方面。大量学者<sup>[2-4]</sup>研究表明,冻融作用降低了土壤结构的稳定性,增加了坡面土壤侵蚀量。左小锋等<sup>[5]</sup>发现,前期坡面水蚀作用对地表产生了明显抗风蚀效应的结果。高玄娜等<sup>[6]</sup>研究表明,砟砂岩坡面在冻融+水蚀作用下粗颗粒产出明显,冻融作用对粗颗粒的影响显著;冻融+风蚀+水蚀作用下坡面稳定性最差,侵蚀泥沙颗粒变化最剧烈。桑琦明等<sup>[7]</sup>发现黑土区前期土壤冻融与风蚀叠加作用明显增加了后期坡面水蚀量。Tiessen 等<sup>[8]</sup>研究表明,融雪通常发生在冻土上,在短时间内几乎没有渗透,导致高径流量。

现有对于东北黑土区复合侵蚀的研究仍相对较少,多营力复合作用引起的土壤侵蚀机制仍不明确,较少考虑年内不同侵蚀形式交替叠加的侵蚀过程,且缺少大尺度侵蚀类型时空变化与主控因素等方面的研究。本文以刘宝元等<sup>[9]</sup>对东北黑土区的界定范围为例,应用气象及遥感等数据进行东北黑土区土壤侵蚀关键自然驱动因子时间叠加、空间分布特征及耦合驱动机制分析,为东北黑土区的土壤复合侵蚀研究及防治提供科学依据。

1 研究区概况及数据处理

1.1 研究区概况

本研究东北黑土区范围涵盖了辽宁省、吉林省、

黑龙江省以及内蒙古自治区的部分区域,范围在东经 112°16′49″—133°54′47″,北纬 52°4′14″—40°55′43″,面积 55.65 万 km<sup>2</sup>,区内包括蒙东黑土亚区、松嫩黑土亚区、三江黑土亚区。根据研究需要,选取黑土区人类活动强度大且复合侵蚀形式显著的 11 个地区作为典型区进行研究,分别为海拉尔、嫩江、克山、齐齐哈尔、海伦、科右前旗、佳木斯、宾县、通榆、锡林浩特和四平,具体分布如图 1 所示。

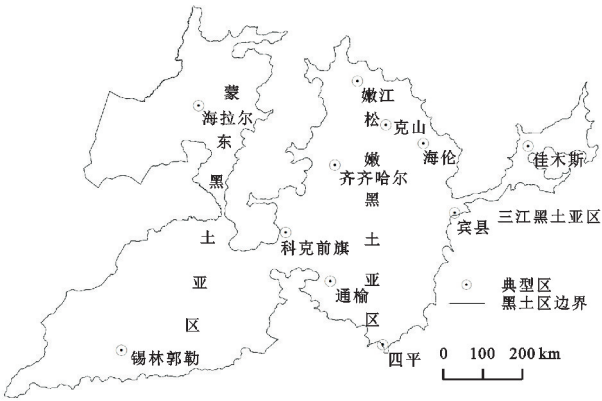


图 1 东北黑土区典型区分布  
Fig. 1 Distribution Map of Typical Areas in Northeast Mollisol Region

1.2 数据处理

气象数据来源于中国国家气象网,包括 1990—2020 年 11 个典型区气象站点的日平均气温、日最高气温、日最低气温、日最大风速,2011—2020 年 11 个典型区气象站点的逐小时降雨量、逐小时气温。各典型区进行数据处理时均使用单一气象站点替代,气象数据在各站点都偶有缺失,缺失数据以其他未缺失年份相同日期数据的平均值补充。雪水当量数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (<http://www.ncdc.ac.cn>)<sup>[10]</sup>,包括 1990—2020 年逐日雪水当量。各数据类型及来源见表 1。

1.2.1 水力侵蚀驱动因子 东北黑土区降雨特点为短历时、强降雨,以往研究表明降雨强度是影响黑土区坡面侵蚀的重要因素<sup>[11-12]</sup>,因此以降雨强度作为水蚀主要驱动因子。以 2011—2020 年逐时降雨量数据

为基础,计算多年平均逐日降雨强度:

$$I = P / T$$

式中:  $I$  为逐日降雨强度 (mm/h);  $P$  为日降雨量 (mm);  $T$  为降雨历时 (h)。

表 1 数据类型及来源

Table 1 Data type and source

数据类型	时间	数据来源	参数	数据精度
降雨	2011—2020	国家气象站	时降雨量 (mm)	时间分辨率为 1 h
风速	1990—2020	国家气象站	日最大风速 (m/s)	时间分辨率为 24 h
气温	1990—2020	国家气象站	日最高气温 (°C) 日最低气温 (°C)	时间分辨率为 24 h
气温	2011—2020	国家气象站	时气温 (°C)	时间分辨率为 1 h
雪水当量	1990—2020	国家冰川冻土沙漠科学数据中心	雪水当量 (mm)	空间分辨率为 25 km, 时间分辨率为 1 h

需要注意的是,东北黑土区每年 11 月至次年 4 月降水主要以降雪为主,几乎不会造成土壤侵蚀,各典型区多年平均日最高气温  $> 0^{\circ}\text{C}$  时计为水蚀开始,多年平均日最低气温  $< 0^{\circ}\text{C}$  时水蚀结束,计算各典型区多年平均逐日降雨强度。

1.2.2 风力侵蚀驱动因子 本研究选择日最大风速作为风蚀驱动因子,日最大风速为一天内任意 10 min 平均风速的最大值,可以反映一天中风速最大时段的风速情况。在作物生长季内,地表覆盖减小了地表风速<sup>[13]</sup>,降低了风蚀,且在植被盖度超过 70% 时,基本不产生风蚀<sup>[14]</sup>,故在作物生长阶段 (5—10 月) 不考虑风蚀发生。以 1990—2020 年逐日最大风速数据为基础计算日平均最大风速起沙风速为 5 m/s。

1.2.3 冻融作用驱动因子 一天内最高气温  $> 0^{\circ}\text{C}$  且日最低气温  $< 0^{\circ}\text{C}$  视为发生冻融作用。冻融温差越大、冻结温度越低越有可能发生冻融侵蚀<sup>[15]</sup>,选取气温日较差及气温改变强度作为冻融作用驱动因子。

气温日较差为日最高气温与日最低气温的差值,气温日较差越大冻融作用越剧烈。计算公式为:

$$T_{\text{dr}} = T_{\text{max}} - T_{\text{min}} \quad (2)$$

式中:  $T_{\text{dr}}$  表示气温日较差 (°C);  $T_{\text{max}}$  表示日最高气温 (°C);  $T_{\text{min}}$  表示日最低气温 (°C)。

在气温日较差相同时,冻结温度越低强度越大。以日最高温度与日最低温度之和判断气温改变强度大小,计算公式为:

$$T_{\text{ci}} = T_{\text{max}} + T_{\text{min}} \quad (3)$$

式中:  $T_{\text{ci}}$  表示气温改变强度 (°C)。

1.2.4 融雪侵蚀驱动因子 本研究在日平均气温连续 5 d 高于  $2^{\circ}\text{C}$  时计为融雪开始,首次高于  $2^{\circ}\text{C}$  的日期作为融雪开始日期,当日平均气温计为融雪开始气温。融雪开始 10 d 内计为融雪期。融雪径流是融雪侵蚀产生的主要原因,根据现有野外试验观测<sup>[16]</sup>,由于温度的迅速回升及雪水当量的迅速增大产生融雪径流,因此选取雪水当量变化速率、升温速率、日高温起始值及其持续时间作为融雪作用的驱动因子。

式中:  $I$  为逐日降雨强度 (mm/h);  $P$  为日降雨量 (mm);  $T$  为降雨历时 (h)。

以 1990—2020 年多年平均日均雪水当量为为基础,进行春季融雪期雪水当量日变化速率的计算,逐日雪水当量变化速率计算公式为:

$$R_s = \frac{(SWE_2 - SWE_1)}{d} \quad (4)$$

式中:  $R_s$  为每日雪水当量变化速率 (mm/d);  $SWE_1$  为前一日多年平均日均雪水当量 (mm);  $SWE_2$  为后一日多年平均日均雪水当量 (mm);  $d$  为天数,默认为 1。

以 1990—2020 年多年平均日均气温为基础,进行春季融雪期升温速率的计算,春季融雪期升温速率为融雪开始日期起 10 d 内每日升温速率,计算公式为:

$$R_h = \frac{(T_2 - T_1)}{d} \quad (5)$$

式中:  $R_h$  为每日升温速率 (°C/d);  $T_1$  为前一日多年平均日均气温 (°C);  $T_2$  为后一日多年平均日均气温 (°C)。

融雪期一天中最高温度取整作为日高温起始值,统计一天中日高温起始值的小时数作为日高温持续时间。

## 2 结果与分析

### 2.1 自然侵蚀驱动因子时空分异特征

东北黑土区年内水力、风力、冻融、融雪作用驱动因子交替叠加出现,总体上可将其分为 5 种类型侵蚀因子驱动及交替或叠加驱动形式,分别为水力侵蚀驱动因子、风力侵蚀驱动因子、水—风力侵蚀驱动因子交替与叠加、水—风—冻融侵蚀驱动因子交替与叠加、水—风—冻融—融雪侵蚀驱动因子交替与叠加。各典型区复合侵蚀发生形式及时间见图 2。

年初东北黑土区各地均主要以风蚀驱动因子发生为主,持续时长整体呈现东西两向至中部减小的趋势,此时土壤冻结且部分地区存在积雪覆盖,难以带来严重的侵蚀结果。2 月末—3 月初当温度条件达到冻融作用发生条件后冻融作用开始,此阶段水—风—冻融侵蚀驱动因子叠加存在,整个春季冻融期主要集中在 2 月末—4 月下旬,起始时间由东南向西北逐渐延后,持续时长大致呈现西南长于东北。冻融作用改

变了大团聚体的稳定性,随着冻融次数的增加小团聚体含量随之增加,土壤结构越不稳定。此时风速普遍较大且土壤结构松散,表层土壤更易被大风剥离,该时段可能会出现少量降水事件使土壤含水量增加进而减少风蚀的产生,此阶段将持续至温度条件不满足冻融作用发生为止。与此同时,在 3 月末—4 月上旬存有积雪的地区将会以水—风—冻融—融雪侵蚀驱动因子叠加形式存在,发生时间由东南向西北逐渐延后。融雪开始后侵蚀驱动因子将以融雪径流形式存在,此时土壤表层解冻且下层冻结形成不透水层,致使融雪径流下渗量少,表层解冻土壤结构松散,将进一步强化融雪径流侵蚀产沙能力。积雪的融化也会使土壤含水率增加带来后期风蚀量减小。4 月中下旬水—风侵蚀驱动因子叠加为全区主要复合侵蚀形式,该时段风速为全年最大,风蚀侵蚀量也相应增加。该时段内有少部分地区降雨强度相对较大,使表层土壤含水量增加进而减少风蚀量;该时段也有少部分区域降水强度足以形成径流使水蚀量增加,整体侵蚀量也将发生变化。5—10 月各地均以水蚀驱动因子发生为主,无其他侵蚀因子共同作用。此时区内易发生强降雨造成严重的水蚀,植被盖度也会增大,在一定程度上可减弱水蚀驱动因子产生的影响。10 月初各地进入秋收活动阶段,作物覆盖率短时间内急速下降,林草覆盖也开始相应降低,日最大风速超过起沙风速带来风蚀可能性增加;此时降雨强度平均在 0.05~0.15 mm/h,也会对侵蚀结果产生一定影响。10 月初—11 月中下旬秋季冻融作用发生,该时段水—风—冻融侵蚀驱动因子同时存在,发生时间由西南向东北逐渐推后,持续时长大致由西南向东北逐渐减小,该时段冻融作用驱动因子强度较春季相对较弱,

日最大风速较前期减小但仍超过起沙风速,水蚀驱动因子仍然存在但强度较弱,3 种侵蚀驱动因子共同作用影响侵蚀结果,该阶段直至年末以风蚀驱动或无驱动因子发生为主,此时土壤冻结,部分地区有积雪覆盖,几乎无侵蚀产生。

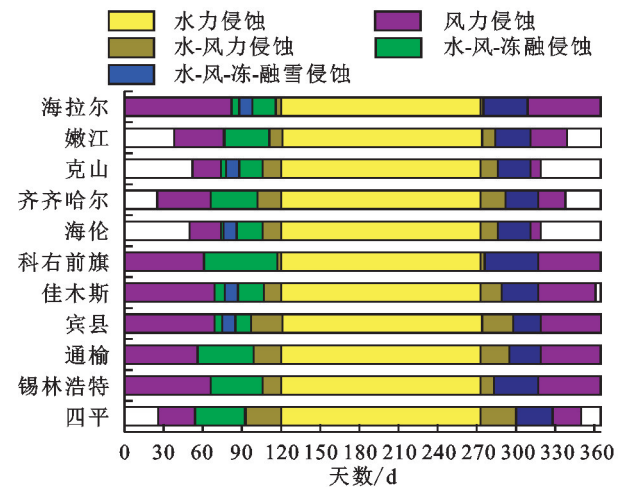


图 2 典型区侵蚀驱动因子交替与叠加时间分布  
Fig. 2 Alternating and superimposed time distribution of erosion drivers in typical areas

综上所述,东北黑土区春季以风力、冻融、融雪驱动因子为主导,夏季以水力驱动因子为主导,秋季以水力、风力、冻融驱动因子为主导,冬季以风力驱动因子为主导,不同土壤侵蚀驱动因子年内多次交替叠加出现,相互影响,带来黑土区独特的复合侵蚀现象。

2.2 不同区域关键自然驱动因子辨析

除融雪作用外水力、风力、冻融作用在各地均有不同程度的发生。根据各自然侵蚀驱动因子发生强度和时长等及综合选取年均降雨强度、最大降雨强度等 7 个特征值进行对比,总结 11 个典型区土壤侵蚀自然驱动因子的分异特征见表 2。

表 2 土壤侵蚀自然驱动因子区内分异特征值

Table 2 Characteristic values of internal differentiation of natural driving factors for soil erosion						
典型区	日均降雨强度/ (mm · h <sup>-1</sup> )	降雨强度峰值/ (mm · h <sup>-1</sup> )	风蚀期平均 日最大风速/ (m · s <sup>-1</sup> )	风蚀期日 最大风速>5 m/s 天数/d	冻融期平均 气温日较差/℃	无积雪 年数/a
海拉尔	0.30	2.62	6.32	188	11.99	0
嫩江	0.41	2.87	6.08	152	12.36	1
克山	0.44	2.9	5.13	108	10.86	1
齐齐哈尔	0.33	2.68	5.47	36	11.3	13
海伦	0.48	2.6	5.24	118	10.64	1
科右前旗	0.40	3.6	6.83	213	14.92	23
佳木斯	0.41	3.15	5.89	189	11.28	0
宾县	0.43	2.53	6.42	204	9.93	0
通榆	0.33	3.48	6.44	202	12.52	16
锡林浩特	0.29	4.29	7.1	213	13.89	3
四平	0.40	3.63	5.73	164	10.58	7



东北黑土区全域降雨强度峰值大,降雨事件发生集中,水力侵蚀作用严重;风蚀期土地裸露,部分地区日最大风速超过起沙风速且日数超过 200 d 引起强烈风蚀;季节性冻融频发,全区冻融期气温日较差在  $14.92\sim 9.93\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,部分地区冻融期气温日较差超过  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,昼融夜冻,冻融作用更加显著;初春季节部分地区无积雪年数 $\leq 1$ ,常年存有积雪,极易发生融雪侵蚀。根据侵蚀因子相对影响程度不同可划分为 5 个侵蚀作用区,见表 3。

2.2.1 水力侵蚀作用区 水力侵蚀作用区(图 3)集中在松嫩黑土亚区西北部及南部,区内以水力驱动因子发生更为强烈,典型区齐齐哈尔、四平日均降雨强度分别可达  $0.33\text{ mm/h}$  和  $0.40\text{ mm/h}$ ,6—8 月降雨强度

大,降雨强度峰值可达  $2.68\text{ mm/h}$  和  $3.63\text{ mm/h}$ ,出现在 7 月中旬—8 月中旬,易发生降雨侵蚀。其他驱动因子也有发生但不显著,日最大风速大于  $5\text{ m/s}$  日数不超过 200 d,未引起强烈风蚀;冻融期平均气温日较差不超过  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冻融作用不显著;初春季节很少有积雪覆盖,不易发生融雪侵蚀。

表 3 侵蚀作用区

Table 3 Erosional zone

侵蚀作用区	典型地点
水力侵蚀作用区	齐齐哈尔、四平
水力—融雪侵蚀作用区	克山、海伦、佳木斯
水力—风力—冻融侵蚀作用区	科右前旗、通榆、锡林浩特
水力—风力—融雪侵蚀作用区	宾县
水力—冻融—融雪侵蚀作用区	海拉尔、嫩江

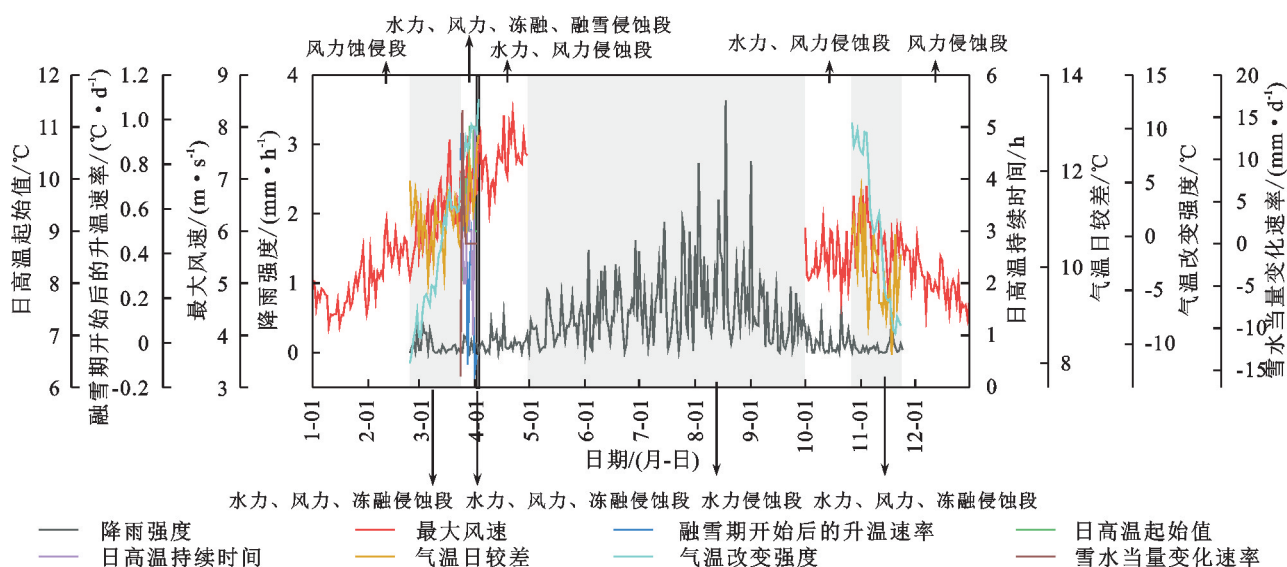


图 3 东北黑土区典型区自然侵蚀驱动因子叠加时间序列曲线(四平)

Fig. 3 The northeast black earth area superposition of driving factors in typical regional natural erosion time sequence diagram (Siping)

2.2.2 水力—融雪侵蚀作用区 水力—融雪侵蚀作用区(图 4)集中在松嫩黑土亚区东北部及三江黑土亚区,以水力、融雪驱动因子作用更为强烈。区内典型区克山、海伦、佳木斯 6—9 月降雨强度大,易发生降雨侵蚀,日均降雨强度分别为  $0.44\text{ mm/h}$ ,  $0.48\text{ mm/h}$ ,  $0.41\text{ mm/h}$ ,峰值可达  $2.9\text{ mm/h}$ ,  $2.6\text{ mm/h}$ ,  $3.15\text{ mm/h}$ ,出现在 7 月中旬—8 月初。研究年范围内融雪期常年存在积雪,几乎不存在无积雪年份,融雪侵蚀发生时间主要集中在 3 月下旬,此时积雪融化,雪水当量变化速率普遍为负值,典型区平均升温速率分别为  $0.45\text{ }^{\circ}\text{C/d}$ ,  $0.40\text{ }^{\circ}\text{C/d}$ ,  $0.24\text{ }^{\circ}\text{C/d}$ ,日高温起始值持续上升,最高可达  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,持续时间普遍在 3 h。其他驱动因子也有发生但不显著,日最大风速大于  $5\text{ m/s}$  日数未超过 200 d,没有引起强烈风蚀;冻融期平均气温日较差不超过  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冻融作用不显著。

2.2.3 水力—风力—冻融侵蚀作用区 水力—风力—冻融侵蚀作用区(图 5)集中在蒙东黑土亚区南部及松嫩黑土亚区西南部,水力、风力、冻融驱动因子作用更为强烈。典型区科右前旗、通榆、锡林浩特日均降雨强度分别为  $0.40\text{ mm/h}$ ,  $0.33\text{ mm/h}$ ,  $0.29\text{ mm/h}$ ,峰值可达  $3.6\text{ mm/h}$ ,  $3.48\text{ mm/h}$ ,  $4.29\text{ mm/h}$ ,6—8 月降雨强度较大且易出现极端降雨发生降雨侵蚀。1—4 月、10—12 月风力驱动因子发生,典型区风蚀期日最大风速 $>5\text{ m/s}$  分别有 213, 202, 213 d,平均日最大风速分别为  $6.83\text{ m/s}$ ,  $6.44\text{ m/s}$ ,  $7.1\text{ m/s}$ ,最大值可达  $8.91\text{ m/s}$ ,  $9.34\text{ m/s}$ ,  $10.37\text{ m/s}$ ,出现在 4 月下旬,此时风力驱动因子最为强烈易发生风力侵蚀。冻融作用发生时间主要集中在 3—4 月中旬及 10—11 月中旬,冻融期平均气温日较差超过  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,典型区春季冻融期平均气温日较差分别为  $15.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $13.19\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $14.31\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,秋季为

14.35℃, 11.34℃, 13.38℃, 气温改变强度在春季由-15.3℃, -12.43℃, -13.97℃持续升高至18.82℃, 12.93℃, 14.78℃, 秋季由16.01℃, 12.40℃, 12.82℃持续降低至-10.52℃, -9.00℃, -9.88℃, 春季冻融作用驱动因子较秋季更为强烈, 更易发生严重的冻融作用。初春季节很少有积雪覆盖, 不易发生融雪侵蚀。

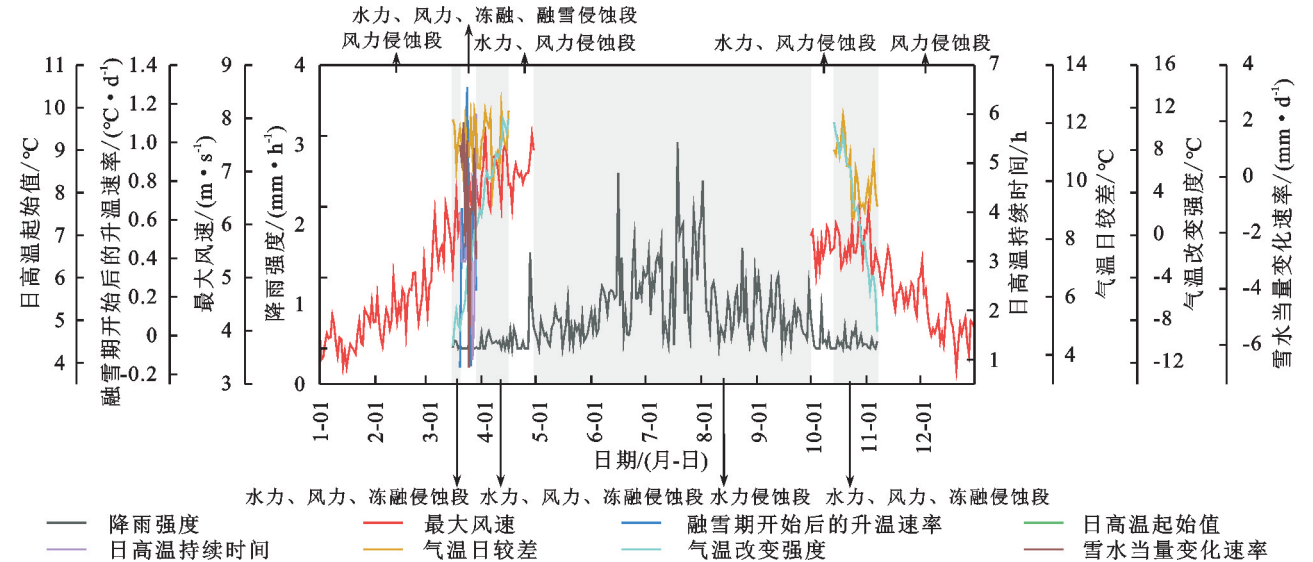


图 4 东北黑土区典型区位自然侵蚀驱动因子叠加时间序列曲线(克山)  
Fig. 4 The northeast black earth area superposition of driving factors in typical regional natural erosion time sequence diagram (Keshan)

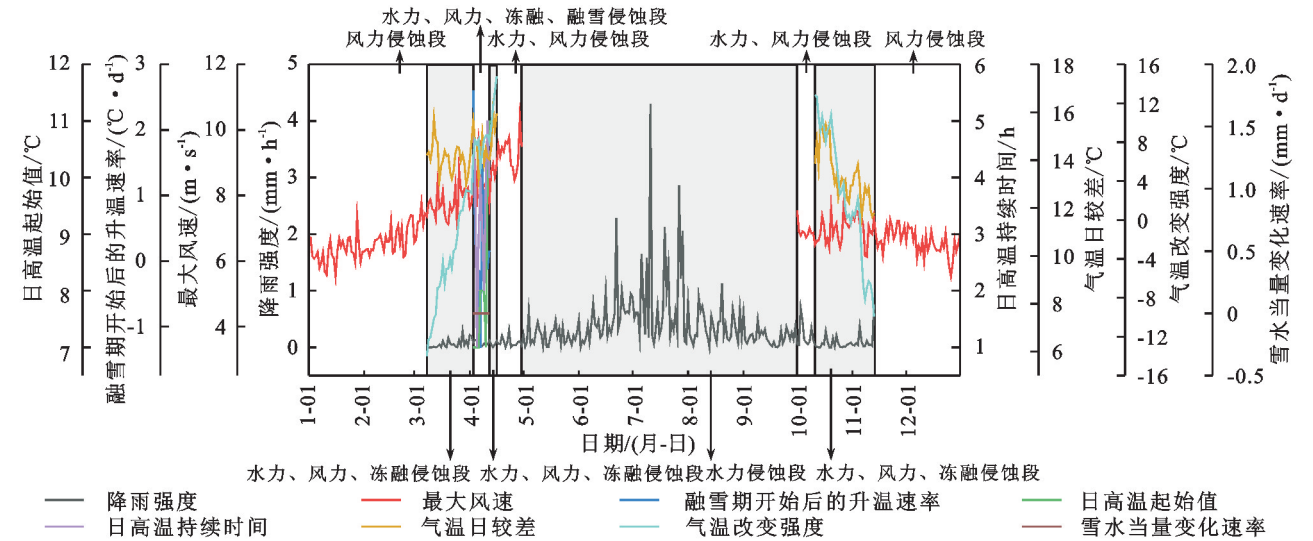


图 5 东北黑土区典型区位自然侵蚀驱动因子叠加时间序列曲线(锡林浩特)  
Fig. 5 The northeast black earth area superposition of driving factors in typical regional natural erosion time sequence diagram (Xilinhaote)

2.2.4 水力—风力—融雪侵蚀作用区 水力—风力—融雪侵蚀作用区(图 6)集中在松嫩黑土亚区东部, 以水力、融雪驱动因子作用更为强烈。区内典型区宾县 6—9 月降雨强度大, 易发生降雨侵蚀, 日均降雨强度为 0.43 mm/h, 峰值可达 2.53 mm/h, 出现在 8 月初。1—4 月、10—12 月风力驱动因子发生, 典型区风蚀期日最大风速 > 5 m/s 有 204 d, 平均日最大风速为 6.42 m/s, 最大值可达 8.73 m/s, 出现在 4 月下旬, 此时风力驱动因子最为强烈易发生风力侵蚀。研究年范围内融雪期常年存在积雪, 几乎不存在无积

雪年份, 融雪侵蚀发生时间主要集中在 3 月下旬, 此时积雪融化, 典型区雪水当量变化速率普遍为负值, 平均升温速率为 0.40℃/d, 日高温起始值由 2℃持续上升, 最高可达 8℃, 持续时间普遍在 3 h。冻融期平均气温日较差不超过 12℃, 冻融作用不显著。  
2.2.5 水力—冻融—融雪侵蚀作用区 水力—冻融—融雪侵蚀作用区(图 7)集中在蒙东黑土亚区及松嫩黑土亚区北部, 区内水力、风力、冻融及融雪驱动因子作用更为强烈。区内典型区海拉尔、嫩江 6—9 月降雨强度最大易发生降雨侵蚀, 日均降雨强度分别

为 0.30 mm/h, 0.41 mm/h, 峰值可达 2.62 mm/h, 2.87 mm/h, 发生在 7 月中旬—8 月中旬, 易发生极端降雨事件。冻融作用发生时间主要集中在 3 月下旬—4 月下旬及 10—11 月上旬, 典型区冻融期平均气温日较差超过 12 °C, 春季冻融期平均气温日较差为 12.27 °C, 13.01 °C, 秋季为 11.71 °C, 11.53 °C, 气温改变强度在春季由 -10.25 °C, -12.67 °C 持续升高至 11.95 °C, 11.83 °C, 秋季由 10.79 °C, -9.78 °C 持续降低至 -9.78 °C, -9.72 °C, 春

季冻融作用驱动因子较秋季更为强烈, 更易发生严重的冻融作用。研究年范围内融雪期常年存在积雪, 几乎不存在无积雪年份, 融雪侵蚀发生时间分别集中在 4 月上旬和 3 月下旬, 此时积雪融化, 雪水当量变化速率普遍为负值, 典型区平均升温速率分别为 0.37 °C/d, 0.38 °C/d, 日高温起始值持续上升, 最高可达 5 °C, 持续时间普遍在 3 h。日最大风速大于 5 m/s 日数未超过 200 d, 没有引起强烈风蚀。

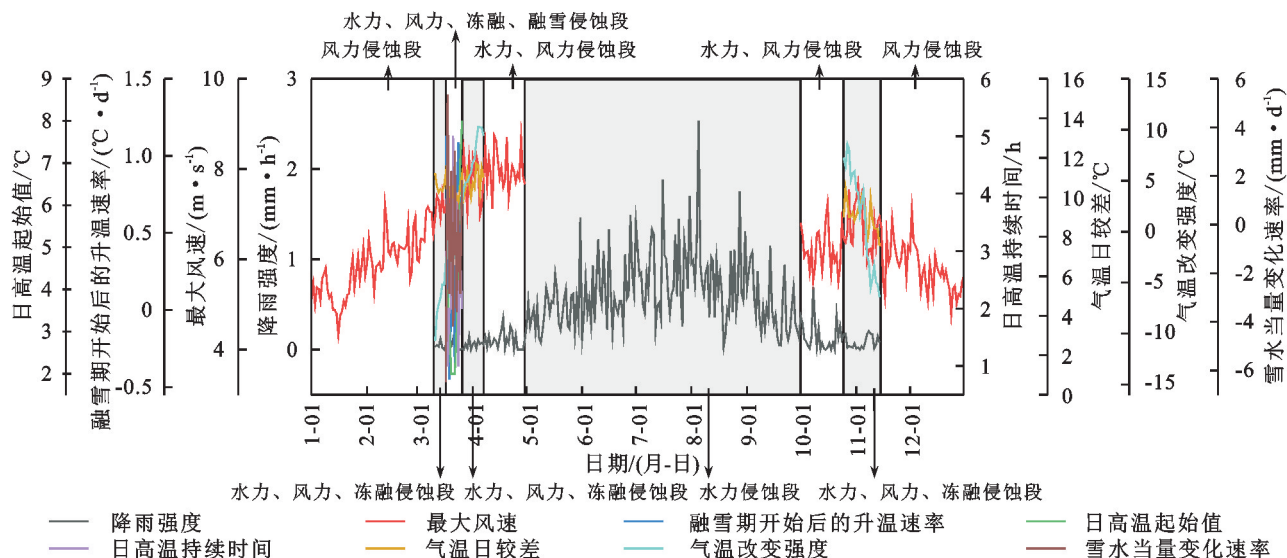


图6 东北黑土区典型区位自然侵蚀驱动因子叠加时间序列曲线(宾县)

Fig. 6 The northeast black earth area superposition of driving factors in typical regional natural erosion time sequence diagram (Binxian)

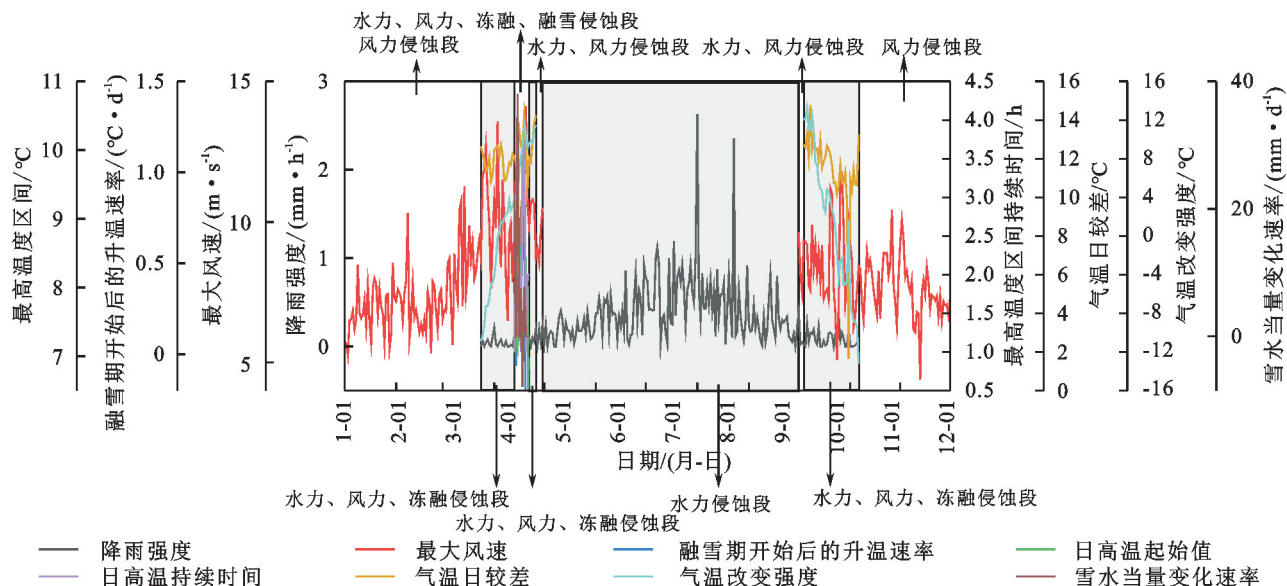


图7 东北黑土区典型区位自然侵蚀驱动因子叠加时间序列曲线(海拉尔)

Fig. 7 The northeast black earth area superposition of driving factors in typical regional natural erosion time sequence diagram (Hailaer)

空间分布上, 东北黑土区水力驱动作用由东南向西北逐渐减小, 年内降雨侵蚀驱动因子强烈作用时期由西北向东南逐渐延后, 主要集中在 7—8 月中旬。风力作用由西南向东北呈现逐渐减小的趋势, 较强作

用于蒙东黑土亚区及松嫩黑土亚区东部。冻融作用驱动因子中的气温日较差在空间上由西南向东北逐渐减小, 气温改变强度由西南向东北逐渐减小, 总体而言冻融作用由西南向东北逐渐减小, 作用时间春季



由西北向东南逐渐延后,秋季反之,较强发生在蒙东黑土亚区及松嫩黑土亚区北部。融雪期常年存在积雪的地区主要集中在蒙东黑土亚区北部及松嫩黑土亚区东部,雪水当量变化速率蒙东黑土亚区北部较松嫩黑土亚区东南部更大,升温速率、日最高温度由西向东增大,融雪作用的发生主要由雪水当量情况决定,总体而言融雪作用呈现由西北向东南逐渐减小的趋势,较强作用于蒙东黑土亚区北部及松嫩黑土亚区东北部,发生时间由东南到西北逐渐延后,主要集中在3月下旬—4月中旬。

### 3 结论

(1) 东北黑土区年初均主要以风蚀驱动因子发生为主,2月末—4月下旬水—风—冻融侵蚀驱动因子交替叠加出现,在3月末—4月上旬存在积雪的地区将以水—风—冻融—融雪侵蚀驱动因子交替叠加存在,4月中下旬,水—风侵蚀驱动因子为主要交替叠加形式,5—10月以水蚀驱动因子发生为主,10月初水—风驱动因子交替叠加,10月初—11月中下旬水—风—冻融侵蚀驱动因子同时存在,以上阶段直至年末主要为风蚀驱动因子出现或无驱动因子发生。

(2) 在空间上,各侵蚀驱动因子存在明显的空间分异特征,水力侵蚀驱动由东南向西北逐渐减小,风力驱动因子由西南向东北逐渐减小,冻融驱动因子呈现由西南向东北逐渐减小的趋势,融雪作用驱动因子呈现由西北向东南逐渐减小的趋势。

(3) 根据侵蚀驱动因子分异特征可将全区划分为水力、水力—融雪、水力—风力—冻融、水力—风力—融雪、水力—冻融—融雪5类侵蚀作用区。水力作用区集中在松嫩黑土亚区西北部及南部,水力—融雪侵蚀作用区集中在松嫩黑土亚区东北部及三江黑土亚区,水力—风力—冻融侵蚀作用区主要集中在蒙东黑土亚区南部及松嫩黑土亚区西南部,水力—风力—融雪侵蚀作用区集中在松嫩黑土亚区东部,水力—冻融—融雪侵蚀作用区主要集中在蒙东黑土亚区北部及松嫩黑土亚区北部,各区域侵蚀驱动因子交替叠加特征不同,可对不同区域进行针对性的土壤侵蚀治理。

#### 参考文献(References):

- [1] 郑粉莉,张加琼,刘刚,等.东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特征与多营力复合侵蚀的研究重点[J].水土保持通报,2019,39(4):314-319.  
Zheng F L, Zhang J Q, Liu G, et al. Characteristics of soil erosion on sloping farmlands and key fields for studying compound soil erosion caused by multi-forces in Mollisol region of Northeast China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(4):314-319.
- [2] 王飞超,任宗萍,李鹏,等.模拟降雨下冻融作用对坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持研究,2018,25(1):72-75,83.  
Wang F C, Ren Z P, Li P, et al. Effects of freeze-thaw on soil erosion and sediment under simulated rainfall[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(1):72-75,83.
- [3] Zhao Y S, Wang E H, Cruse R M, et al. Characterization of seasonal freeze-thaw and potential impacts on soil erosion in Northeast China[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2012,92(3):567-571.
- [4] Wang T, Li P, Ren Z P, et al. Effects of freeze-thaw on soil erosion processes and sediment selectivity under simulated rainfall[J]. Journal of Arid Land, 2017,9(2):234-243.
- [5] 左小锋,郑粉莉,张加琼,等.典型薄层黑土区前期坡面水蚀对土壤风蚀的影响[J].农业工程学报,2021,37(12):45-53.  
Zuo X F, Zheng F L, Zhang J Q, et al. Effect of previous sloping water erosion on soil wind erosion in typical thin layered Mollisol region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(12):45-53.
- [6] 高玄娜,肖培青,张攀,等.复合侵蚀作用下砒砂岩坡面侵蚀泥沙颗粒特征[J].水土保持学报,2021,35(1):44-49.  
Gao X N, Xiao P Q, Zhang P, et al. Particle characteristics of erosion sediment on Pisha sandstone slope under composite erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(1):44-49.
- [7] 桑琦明,郑粉莉,王一菲,等.东北黑土区冻融、风力、水力交互作用对坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2021,35(2):87-95.  
Sang Q M, Zheng F L, Wang Y F, et al. An experimental study on freeze-thaw, wind and water agents impacts on hillslope soil erosion in Chinese Mollisol region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(2):87-95.
- [8] Tiessen K H D, Elliott J A, Yarovitski J, et al. Conventional and conservation tillage: Influence on seasonal runoff, sediment, and nutrient losses in the Canadian prairies[J]. Journal of Environmental Quality, 2010,39(3):964-980.
- [9] 刘宝元,张甘霖,谢云,等.东北黑土区和东北典型黑土区的范围与划界[J].科学通报,2021,66(1):96-106.  
Liu B Y, Zhang G L, Xie Y, et al. Delineating the black soil region and typical black soil region of northeastern China[J]. Chinese Science Bulletin, 2021,66(1):96-106.
- [10] 蒋玲梅,杨建卫,戴礼云,等.中国1980—2020年雪水当量25 km逐日产品[DB/OL].国家冰川冻土沙漠科学数据中心(www.ncdc.ac.cn),2020. DOI: 10.12072/ncdc. I-SNOW. db0002.2020.



- Jiang M L, Yang J W, Dai L Y, et al. Snow water equivalent 25 km daily product in China from 1980 to 2020 [DB/OL]. National Cryosphere Desert Data Center (www.ncdc.ac.cn), 2020. DOI: 10.12072/ncdc.I-SNOW.db0002.2020.
- [11] 何超.薄层黑土区降雨和汇流强度对顺坡垄作坡面水蚀过程的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2018.  
He C. Effects of rainfall intensity and inflow rate on hill-slope water erosion process under longitudinal ridge tillage in the thin layer black soil region of China[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2018.
- [12] Dass A, Chandra S, Choudhary A K, et al. Influence of field re-ponding pattern and plant spacing on rice root-shoot characteristics, yield, and water productivity of two modern cultivars under SRI management in Indian Mollisols[J]. Paddy and Water Environment, 2016,14(1):45-59.
- [13] 司志民,刘海洋,陈智,等.植被盖度和灌木带状配置对近地表风速廓线的影响[J].农机化研究,2016,38(10):178-182.  
Si Z M, Liu H Y, Chen Z, et al. Effects of vegetation coverage and banded repair on near-surface wind velocity profile [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016,38(10):178-182.
- [14] 梁会,田美荣,钱金平,等.基于风蚀模型的宁夏土壤风蚀特征及影响因素[J].水土保持研究,2019,26(1):34-40.  
Liang H, Tian M R, Qian J P, et al. Soil wind erosion characteristics and influence factors in Ningxia based on wind erosion model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(1):34-40.
- [15] 刘佳.东北黑土冻融作用机理与春季解冻期土壤侵蚀模拟研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2011.  
Liu J. Black soil freeze-thaw function mechanism and soil erosion simulation study in the spring thaw period [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2011.
- [16] 华文杏,范昊明,许秀泉,等.东北坡耕地春季融雪侵蚀观测研究[J].水土保持学报,2017,31(2):92-96.  
Hua W X, Fan H M, Xu X Q, et al. Observation on the spring snowmelt erosion of sloping farmland in Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(2):92-96.
- ~~~~~
- (上接第129页)
- [22] Lucas-Borja M E, Hedo J, Cerdá A, et al. Unravelling the importance of forest age stand and forest structure driving microbiological soil properties, enzymatic activities and soil nutrients content in Mediterranean Spanish black pine (*Pinus nigra* Ar. ssp. *salzmannii*) Forest[J]. Science of the Total Environment, 2016, 562:145-154.
- [23] Enrique A G, Bruno C, Christopher A, et al. Effects of nitrogen availability on microbial activities, densities and functional diversities involved in the degradation of a Mediterranean evergreen oak litter (*Quercus ilex* L.) [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008,40(7):1654-1661.
- [24] 解梦怡,冯秀秀,马寰菲,等.秦岭锐齿栎林土壤酶活性与化学计量比变化特征及其影响因素[J].植物生态学报,2020,44(8):885-894.  
Xie M Y, Feng X X, Ma H F, et al. Characteristics of soil enzyme activities and stoichiometry and its influencing factors in *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forests in the Qinling Mountains[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020,44(8):885-894.
- [25] Chen H, Li D J, Xiao K C, et al. Soil microbial processes and resource limitation in Karst and non-Karst forests[J]. Functional Ecology, 2018,32(5):1400-1409.
- [26] Allison S D, Vitousek P M. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005,37(5):937-944.
- [27] Thompson J, Brokaw N, Zimmerman J K, et al. Land use history, environment, and tree composition in a tropical forest[J]. Ecological Applications, 2002,12(5):1344.
- [28] Domeignoz-Horta L A, Pold G, Liu X J A, et al. Microbial diversity drives carbon use efficiency in a model soil [J]. Nature Communications, 2020,11(1):3684.
- [29] Cui Y X, Fang L C, Guo X B, et al. Ecoenzymatic stoichiometry and microbial nutrient limitation in rhizosphere soil in the arid area of the northern Loess Plateau, China [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018,116:11-21.
- [30] 刘冰燕,陈云明,曹扬.渭北黄土区刺槐人工林氮、磷生态化学计量特征[J].西北林学院学报,2016,31(1):1-6,14.  
Liu B Y, Chen Y M, Cao Y. Nitrogen and phosphorus stoichiometry characteristics of *Robinia pseudoacacia* plantation in Weibei Loess Plateau Region[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016,31(1):1-6,14.