不同回填技术下排土场土体裂缝的水分蒸发特征

毛向荣[1]，曹小平[2]，吕 刚[1]，王诏立[3]，李孟楠[4]，孙 琦[4]

（1.辽宁工程技术大学 环境科学与工程学院，辽宁 阜新 123000；2.无棣县城乡水务发展服务中心，山东 无棣 251900；3.铁岭县自然资源事务服务中心，辽宁 铁岭 112000；4.铁岭市自然资源事务服务中心，辽宁 铁岭 112000）

摘　要：［目的］探究排土场土体裂缝在经过不同回填技术处理后土壤的水分蒸发特征，为排土场土体裂缝的有效治理、促进生态环境修复和土地复垦提供科学依据。［方法］试验用土取自海州露天矿西排土场表面覆土，通过对土体裂缝进行模拟回填处理，采用室内模拟蒸发试验进行分析。［结果］裂缝的日蒸发量在试验中呈现出明显的 3 阶段蒸发规律，不同回填处理对裂缝的日蒸发量影响较小；随着裂缝宽度增加，裂缝的累积蒸发量变大，经过回填处理可有效减少裂缝累积蒸发量，回填比例为 1∶1（处理 1）累积蒸发量均为同组裂缝回填下的最小值；裂缝的出现会导致土壤含水率减少，但回填处理能够提高裂缝的含水率，其中回填比例为 1∶1（处理 1）的含水率均为 3 组裂缝的最高值，均值达 29.74%；裂缝宽度的增加对蒸发失水比也有影响，经过回填处理后能够降低蒸发失水比，且回填比例为 1∶1（处理 1）在减少蒸发失水比方面表现最佳。［结论］裂缝的存在对裂缝的日蒸发量、累积蒸发量、含水率和蒸发失水比均有影响，且回填比例为 1∶1（处理 1）在对排土场土体裂缝的水分蒸发研究中表现效果最佳。

关键词：土体裂缝；水分蒸发；回填技术；土壤水分；露天煤矿

文献标识码：B　　**文章编号：**1000-288X(2025)01-0190-09　　**中图分类号：**S157.1，X171.4

文献参数：毛向荣，曹小平，吕刚，等.不同回填技术下排土场土体裂缝的水分蒸发特征[J].水土保持通报，2025，45(1)：190-198. Mao Xiangrong, Cao Xiaoping, Lü Gang, et al. Water evaporation characteristics of soil cracks in dump under different backfill techniques [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 190-198. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.020; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.01.020.

Water evaporation characteristics of soil cracks in dump under different backfill techniques

Mao Xiangrong[1], Cao Xiaoping[2], Lü Gang[1], Wang Zhaoli[3], Li Mengnan[4], Sun Qi[4]

(1.*College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning* 123000, *China*; 2.*Wudi County Urban and Rural Water Development Service Center, Wudi, Shandong* 251900, *China*; 3.*Tieling County Natural Resources Affairs Service Center, Tieling, Liaoning* 112000, *China*; 4.*Tieling Natural Resources Affairs Service Center, Tieling, Liaoning* 112000, *China*)

Abstract: [Objective] The soil water evaporation characteristics of soil cracks after different backfilling techniques was analyzed in order to provide scientific basis for the effective control of soil cracks in the dump hence promote ecological environment restoration and land reclamation. [Methods] The soil was collected from the surface of the west dump of Haizhou open-pit mine and the soil cracks were simulated by backfilling treatment and analyzed by the simulated evaporation test in the laboratory. [Results] The daily evaporation of cracks showed an obvious three-stage evaporation rule, and different backfilling treatments had little effect on the daily evaporation of cracks. With the increase of crack width, the cumulative evaporation of cracks increased and backfill treatment effectively reduced the cumulative evaporation of cracks. The cumulative

收稿日期：2024-07-04　　**修回日期：**2024-11-20　　**采用日期：**2024-11-21

资助项目：辽宁省“兴辽英才计划”项目“辽东水源涵养林区煤矿废弃地生态修复关键技术研究”(XLYC2007046)；国家重点研发计划项目(2017YFC1503105)

第一作者：毛向荣(1999—)，女(汉族)，内蒙古自治区乌兰察布市人，硕士研究生，研究方向为土壤侵蚀与流域治理研究。Email：18347450210@163.com。

通信作者：吕刚(1979—)，男(汉族)，吉林省长春市九台区人，博士，教授，主要从事水土保持与生态修复研究及教学工作。Email：lvgang2637@126.com。

evaporation of cracks with a backfilling ratio of 1∶1 (treatment 1) was the minimum value under the same group of cracks backfilling. The appearance of cracks would lead to the reduction of soil moisture content, but backfill treatment could improve the moisture content of cracks, and the water content of backfilling ratio of 1∶1 (treatment 1) was the highest value of the three groups of cracks, with an average value of 29.74%. The increase of crack width also had an impact on the evaporative water-loss ratio and the backfill treatment could reduce the evaporative water-loss ratio. The backfill ratio of 1∶1 (treatment 1) had the best performance in reducing the evaporative water-loss ratio. [Conclusion] The existence of cracks has an effect on the daily evaporation, cumulative evaporation, water content, and evaporation water loss ratio of cracks, and the 1∶1 backfill ratio (treatment 1) has the best performance in the study of water evaporation of soil cracks in the dump.

Keywords: soil cracks; evaporation of water; backfill technology; soil moisture; open pit coal mine

中国作为世界上最大的煤炭生产国,煤炭开采量直接关系到我国的社会经济发展[1]。现如今社会对于矿山开发过程中对地质环境产生的影响关注度越来越高,矿山开发过程中对地质环境的破坏不仅影响生态环境安全,还会阻碍矿产行业的持续健康发展[2]。在矿区开采煤炭资源的过程中,露天开采是造成生态破坏最严重的开采方式,它不但会对土体结构产生破坏,而且会对地表水、地下水等产生一定的影响,会引起地表的各种损伤,甚至是变形,产生裂缝、塌坑、塌陷盆地、裂隙等地质灾害[3-4]。排土场是露天开采中形成的边坡相间的人工松散堆积体,其坡度较长、较陡、空隙较多,因排土场松散的土壤结构,使得土壤由于自身重力以及水分差异产生沉降,最终导致土体裂缝。排土场地沉陷、土体裂缝等地质灾害不但改变了排土场的地表形态,而且可能导致崩塌、滑坡、水土流失等灾害的发生[5]。土体裂缝是煤矿区最广泛、最具危害性的衍生地质灾害,对地表的入渗、蒸发等水文循环过程及矿区生态安全具有重要影响[6-8]。由于排土场的自身结构及环境条件,导致土壤水分大多来源于天然降雨,而由于土体裂缝的存在使得其水分利用效率降低,同时土体裂缝亦可提高雨水的有效入渗和蒸发,但又会使土体的蓄水和固土能力下降,因而加速径流的产生,若沿着裂缝向下渗透,则产生滑坡、崩塌的风险较大[9]。赵文琦[10]在研究中指出矿区地表出现的裂缝会对土壤蒸发量、入渗系数、含水量分布等产生显著影响,进而加大水土流失、土壤侵蚀、土壤沙漠化的风险,严重影响生态环境条件。李叶鑫等[11]在研究排土场土体裂缝区的土壤团聚体特征中提到,土体裂缝会降低土壤团聚体的稳定性且随着裂缝发育以及宽度的增加对其影响效果会更加显著。郭巧玲等[12]提出裂缝的存在会使土壤含水量减少,且在水平方向上,随着裂缝的宽度或深度增加,土壤含水率呈减少趋势。土体裂缝的出现对土壤养分以及水分甚至植物根系的影响都是显而易见的,目前针对土体裂缝的研究主要集中在裂缝的形成、危害以及对土壤的影响方面,但针对土体裂缝的修复回填研究还较少。为此,本文以露天煤矿排土场为研究对象,研究不同回填物质处理下对土体裂缝水分蒸发的影响,为排土场土体裂缝的有效治理提供理论依据和可行的实践方法,也有助于减少土体蒸发,保护土壤水分,促进生态环境修复和土地复垦。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于辽宁省阜新市海州露天煤矿西排土场,具体地理位置处于东经 121°40′12″,北纬 41°57′36″,毗邻矿区的西南侧。该区域占地面积约为 13 km^2,属于典型的中温带半干旱半湿润季风气候,年平均气温为 7.3 ℃,≥10 ℃年积温达 3 476 ℃,年平均日照长为 2 865.5 h,年蒸发量约为 1 790 mm,春季干旱少雨,降水主要集中在 7—8 月,年平均降水量为 511.4 mm。该区域无霜期为 154 d,年平均风速为 3 m/s。研究区属于北方土石山区,水土流失类型主要以水力侵蚀为主,且排土场内的水分全部来源于天然降水。排土场平台上土体裂缝发育较为严重,且这些裂缝多呈现直线型,其走向与等高线相平行,密切分布在排土场平台前端约 5 m 范围内。

1.2　研究方法

1.2.1　室内蒸发模拟试验设计　试验开展以阜新市海州露天煤矿西排土场作为研究对象,利用土槽进行土体裂缝回填模拟,采用室内模拟蒸发试验,研究在不同回填处理下土体裂缝的水分蒸发特征。试验设计无裂缝土体 CK 和无回填处理的裂缝($CK_{Ⅰ}$,$CK_{Ⅱ}$,$CK_{Ⅲ}$)作为对照组,设计两种因素:裂缝宽度(裂缝Ⅰ、裂缝Ⅱ、裂缝Ⅲ)和回填处理(处理 1,处理 2,处理 3)。3 种裂缝宽度由裂缝的宽深比得出,分别

为5.00,6.25 和 7.5 cm。3 种回填处理土壤与回填物比例分别为 1∶1,1∶3,1∶5。在其两种因素 3 种处理下,将不同回填处理后的土样通过室内模拟蒸发试验后,记录裂缝土壤的日蒸发量、累积蒸发量、含水率及蒸发失水比,通过试验数据分析不同宽度的裂缝在不同回填技术处理下土壤水分蒸发的变化。

1.2.2 *供试试验材料* 试验用土取自露天矿西排土场表面覆土,于 2023 年 5 月 14—21 日进行取土,试验土壤为粉质黏性土,取土后进行风干、过筛处理,将风干后的土样过 2 mm 孔径筛,除去其土壤杂质。土壤 pH 值约为 7.81,有机质含量为 25.42 g/kg。通过现场勘查、调研、参考相关文献,最终选定水稻秸秆、玉米芯和高分子聚乳酸作为裂缝的回填材料[9]。0—5 cm 深度的土体裂缝,回填材料选用 0.5～1.0 cm 规格的水稻秸秆纤维,水稻秸秆可以有效地覆盖表土,且水稻秸秆还田还能促进土壤养分的吸收[13-14]。5—15 cm 深度土体裂缝回填材料选用玉米芯,其极易获取且它的多孔结构具有一定的吸附能力[15]。15—20 cm 深度土体裂缝选用高分子聚乳酸作为回填材料,聚乳酸是一种生物基可降解塑料,它不仅能够在水中或土壤中通过微生物的呼吸作用自然降解并产生乳酸,还能有效减少大气中的二氧化碳含量[16]。

1.2.3 *试验设备* 试验设备采用长宽高为 55 cm×38 cm×30 cm 室内模拟降蒸发聚乙烯土槽进行试验(图 1),试验所用的土样呈直角梯形,整体是上面长 15 cm,宽 25 cm,下面长 50 cm,宽 25 cm 的模拟土样,在放置过程中,它的垂直面和土槽的左面是重叠的,它的长和宽都与土槽一致。土体的上坡角为 145°,下坡角为 35°。模拟排土场土体裂缝采用硬纸板模拟模型,结合裂缝的形态以及现场调查结果和土槽尺寸,将裂缝按照 1∶2 比例缩小模拟,其形状为等腰锐角三角形,设计其长度为 15 cm,深为 20 cm,宽度由设计的宽深比计算,分别为 0.250,0.312 5 和 0.375,得出宽度分别为 5.00,6.25,7.5 cm。

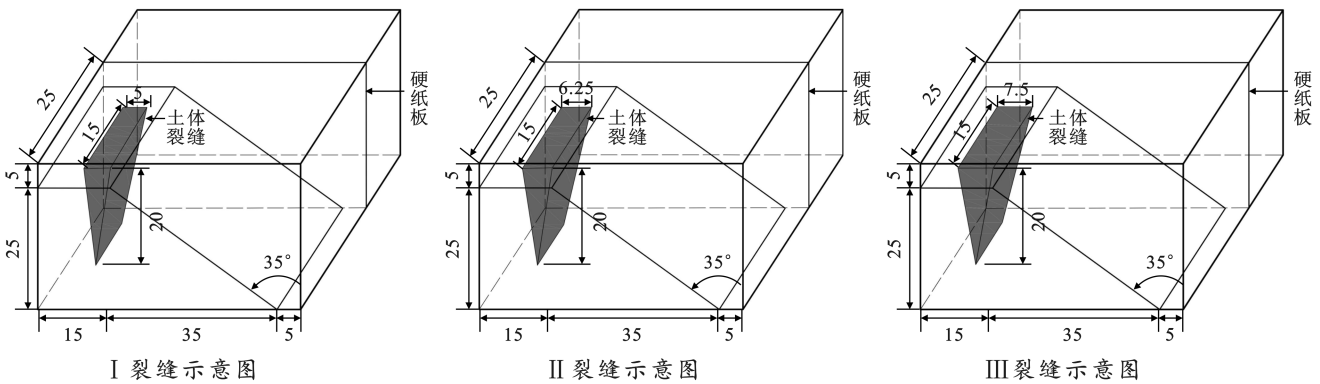

图 1 室内模拟蒸发试验设备

Fig.1 Equipment of indoor simulated evaporation test

1.2.4 *试验开展及实施* 试验于 2023 年 7 月 1 日开始,根据试验设计土壤容重为 1.35 g/cm^3,根据公式(1)将土样按照 5 cm 为 1 层填入土槽内,土壤质量误差控制在 5%之内。在土槽中的土样内埋入模拟裂缝,土体模拟裂缝的放置位置参考图 1。再用一层塑胶薄膜包裹,放置 48 h,让它在重力的作用下凝固,再取出模拟的裂缝,以保证模拟的土体完整。将裂缝分为 3 层进行回填,回填物质采用风干土和不同材料按比例混合,试验风干土 1 kg 为 1 份,水稻秸秆 50 g 为 1 份作为 0—5 cm 深度裂缝的回填物质,玉米芯 125 g 为 1 份作为 5—15 cm 深度裂缝的回填物质,高分子聚乳酸 125 g 为 1 份作为 15—20 cm 深度裂缝的回填物质,按照设定比例,回填材料用量情况详见表 1。根据所设风干土与各层回填材料的比值,将其混合均匀形成 3 种回填物质,按照试验设计的土壤容重 1.35 g/cm^{3}进行裂缝模拟回填(表 1)。

$$\rho=\frac{m}{V} \tag{1}$$

式中:ρ 为土壤容重(g/cm^3);m 为土壤质量(g);V 为土壤体积(cm^3)。

表 1 裂缝回填物质用量

Table 1 Material amount of crack backfill

裂缝深度/cm	回填物质	风干土/kg	回填物质用量/(g·kg^{-1})		
			处理 1	处理 2	处理 3
0—5	水稻秸秆	1	50	150	250
5—15	玉米芯	1	125	375	625
15—20	高分子聚乳酸	1	125	375	625

注:处理 1,2,3 表示土壤与回填物比例分别为 1∶1,1∶3,1∶5。

对经过不同回填方式处理的土体裂缝模型进行注水,以模拟排土场土壤的含水量。待土壤达到饱和后,放置 24 h,使土壤处于相对稳定状态。土体裂缝的水分蒸发特征采用称重法进行观测,将土槽放置于室内。

于 2023 年 7 月 5 日至 9 月 3 日期间,试验期 60 d,每天称重以记录土槽的重量,测量土壤的蒸发量,并对整个试验过程进行记录。

1.2.5　*数据处理*　采用 Excel 2016 等软件对数据进行分析、整理和图表制作。

2　结果与分析

2.1　不同回填技术处理下排土场土体裂缝的日蒸发量

在温度、湿度、光照和容重等外部环境条件相同的情况下,经过 60 d 的室内蒸发试验记录的土样日蒸发量的变化情况如图 2 所示。从图 2 折线趋势可以看到,在不同处理下 3 种宽度裂缝的日蒸发量变化规律及走向与 CK 对照组基本一致,但相较于 CK 对照组,3 种裂缝呈现的变化幅度以及在个别时间段还存在一定差别。

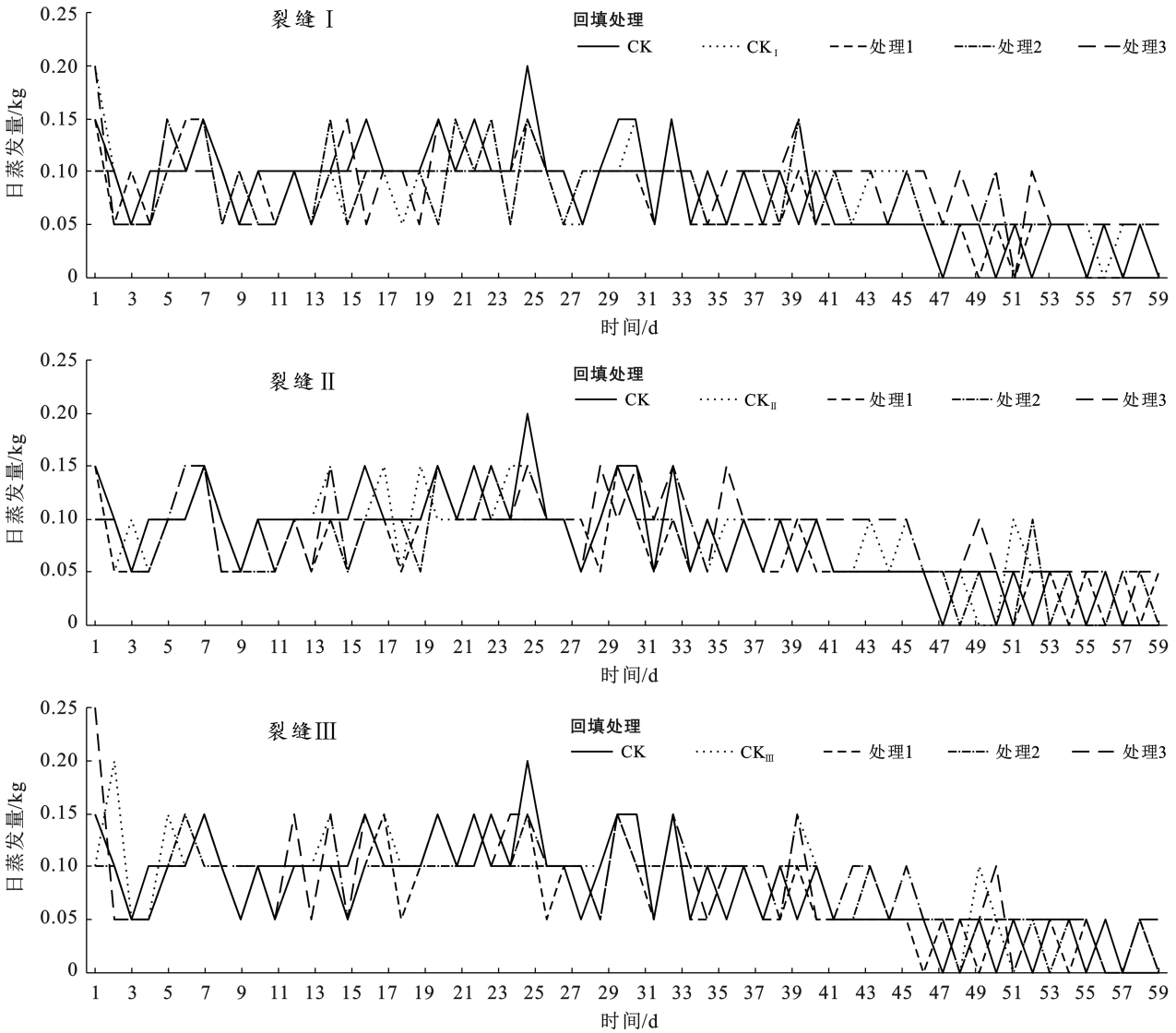

图 2　不同回填处理下 3 组裂缝的日蒸发量

Fig.2　Daily evaporation of three group cracks under varying backfill treatments

由图 3 可知,无裂缝对照组 CK 在 25 d 日蒸发量最大,日蒸发量最大值为 0.20 kg,并在 41 d 之后呈现规律的减少趋势且在第 48 d 首次出现日蒸发量为 0 的情况,并在后续的时间段共出现 7 次日蒸发量为 0。

由图 3 可知,3 种裂缝在 1～7 d 的日蒸发量变化趋势较大,处于蒸发开始的第一阶段,从土壤饱和状态开始转变为蒸发状态,土壤表层的水分开始逐渐蒸发。在第 8～40 d 的日蒸发量处于平缓状态,蒸发开始逐

渐作用于土壤中层且蒸发速度开始减慢，第 41～60 d 的日蒸发量开始呈明显减少的趋势，蒸发作用开始作用于土壤下层。由此分析土壤在蒸发过程中有 3 个阶段，这 3 种阶段所呈现的趋势都有明显的特点，贾振江等[17]在分析土壤的蒸发特征时将其过程分为 3 个阶段，其中存在有两个明显的阶段，显现蒸发效果明显，第一阶段因土壤蒸发开始时处于饱和状态，蒸发率较高，在第 2 和第 3 阶段土壤蒸发开始转向于非饱和状态，整体蒸发量呈减少趋势。在本试验过程中，在第 7 d 后，整体蒸发量趋于下降状态，与其论证相符。由以上对 3 组裂缝以及对照组的日蒸发量变化规律总结可知，裂缝Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ在不同回填处理下日蒸发量与对照组的日蒸发量的变化规律基本一致，说明不同回填处理对裂缝的日蒸发量产生影响较少，土壤接近饱和含水量，蒸发速率主要受大气条件影响[18]，所以在其他因素条件一定且土壤都接近饱和状态下观察其日蒸发量，其受不同回填处理的影响不明显。

2.2 不同回填技术处理下排土场土体裂缝的累积蒸发量

图 3 为 3 种宽度裂缝在不同回填处理下 60 d 内土壤的累积蒸发量趋势图。如图 3 所示，从 3 种裂缝在经过不同回填处理后整体的累积蒸发量走势来看，与无裂缝对照组走势相同，都呈现出从持续上升到逐渐平缓的状态。45 d 内累积蒸发量趋势处于持续上升期，累积蒸发量较大，从 45～60 d 走势出现平缓状态，累积蒸发量开始减少。3 组无回填处理的初始裂缝的累积蒸发量关系表现为：$CK_{Ⅰ}<CK_{Ⅱ}<CK_{Ⅲ}$，说明由于裂缝的出现以及裂缝宽度增大，其累积蒸发量开始变大，由于土体裂缝的存在使得土壤与空气的接触面积变大，致使土壤水分蒸发的增加。温欣等[19]在研究不同沉陷应力区土壤水分中提出沉陷拉张应力导致裂缝发育，0—40 cm 深度沉陷拉张作用显著增强土壤蒸发。在经过回填处理后，各裂缝的蒸发性能均产生显著变化，在裂缝Ⅰ中，各回填处理下裂缝的累积蒸发量最大值为 5.1 kg，累积蒸发量的最小值为4.25 kg，且各回填处理与无回填处理裂缝间关系表现为：$Ⅰ_1<Ⅰ_2<CK_{Ⅰ}<Ⅰ_3$；在裂缝Ⅱ中，各回填处理的累积蒸发量最大值为 5.35 kg，累积蒸发量最小值为 4.4 kg，且各回填处理与无回填处理裂缝间的关系表现为：$Ⅱ_1<Ⅱ_2<CK_{Ⅱ}<Ⅱ_3$；在裂缝Ⅲ中，各回填处理的累积蒸发量最大值为 5.25 kg，累积蒸发量的最小值为 4.4 kg，且各回填处理与无回填处理裂缝间关系表现为：$Ⅲ_1<Ⅲ_2<Ⅲ_3<CK_{Ⅲ}$。总结以上累积蒸发量数据和趋势图可知，土体裂缝的存在会增加土壤水分的蒸发，而 3 组裂缝在不同比例回填处理后，累积蒸发量均小于有裂缝无回填对照组，说明对裂缝采用回填处理可抑制土壤水分蒸发，裂缝回填处理采用的回填物秸秆能够显著影响土壤的含水率和温度，有效降低水分蒸发[20]。减少土壤水分蒸发，使土壤具有良好的保水性，为土壤提供持续的水资源。在各组裂缝回填中，回填比例为 1∶1 的处理 1 的累积蒸发量均为各组最小值，土壤与回填物比例为 1∶1 的处理 1 抑制土壤水分蒸发效果较好。

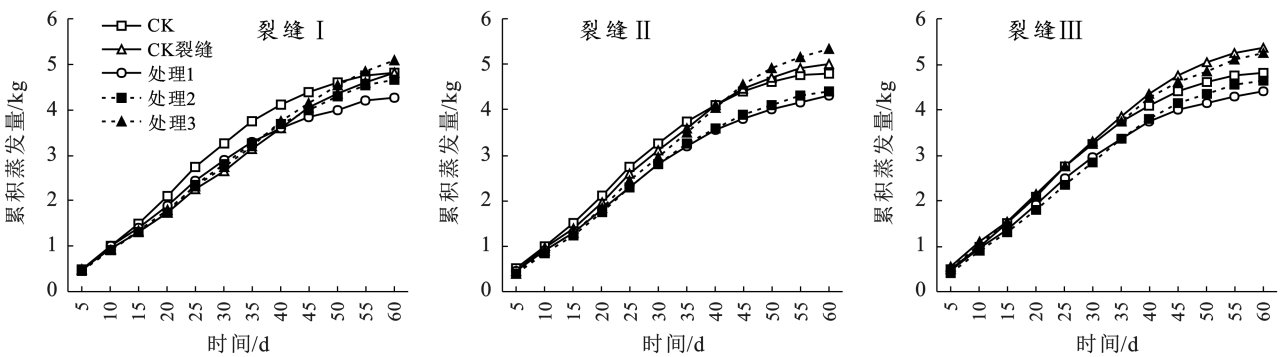

图 3 不同回填处理下 3 组裂缝的累积蒸发量

Fig.3 Cumulative evaporation of three group cracks under different backfill treatment

2.3 不同回填技术处理下排土场土体裂缝的含水率

土壤含水率是土壤水分的直观表现。从图 4 可以看出，经过回填处理的裂缝的含水率比对照组裂缝含水率明显增加。在室内模拟蒸发试验含水率测定中，无裂缝对照组 CK 含水率为 20%，在裂缝Ⅰ中，经过不同处理裂缝的含水率关系表现为：$CK_{Ⅰ}<CK<Ⅰ_3<Ⅰ_2<Ⅰ_1$；在裂缝Ⅱ中，经过不同处理裂缝的含水率关系表现为：$CK_{Ⅱ}<CK<Ⅱ_2<Ⅱ_3<Ⅱ_1$；在裂缝Ⅲ中，经过不同处理裂缝的含水率关系表现为：$CK_{Ⅲ}<CK<Ⅲ_3<Ⅲ_2<Ⅲ_1$。无裂缝对照组 CK 与有

裂缝无回填对照组含水率关系表现为:$CK_{Ⅲ}<CK_{Ⅱ}<CK_{Ⅰ}<CK$,土壤内部裂缝发育,增加土壤与大气的接触面积,蒸发作用增强,土壤含水率减少[19]。随着裂缝宽度的减小,裂隙表面与大气的接触面变得越来越小,水分的蒸发也变得缓慢,土壤含水量也较高[5]。汇总以上关系表现并对比 3 组裂缝在不同回填处理下含水率变化,在裂缝Ⅰ、裂缝Ⅱ、裂缝Ⅲ中,经过回填处理的土体裂缝含水率均高于有裂缝无回填组,说明裂缝经过回填处理后,对裂缝的保水效果产生了影响,使其含水率提高,且在 3 组裂缝中回填比例 1∶1 的处理 1 含水率最高。

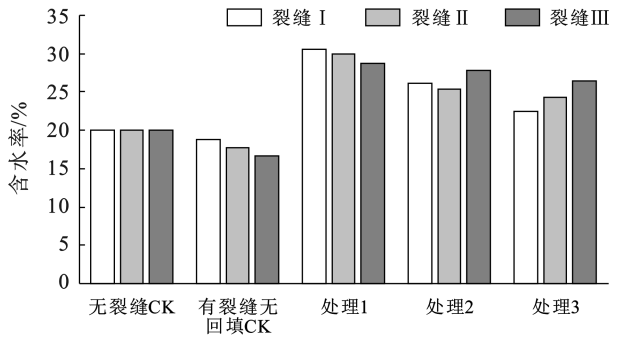

图 4　不同回填处理下 3 组裂缝的土壤含水率

Fig.4　Soil moisture content of three group cracks under different backfill treatment

2.4　不同回填技术处理下排土场土体裂缝的蒸发失水比

影响土壤水分蒸发有两方面因素[21]:①气象因素。大气温度、湿度、降雨量、风速、辐射量等;②土壤本身性质。土壤色泽、表层干土厚度、土壤含水量、土壤含沙量、土壤有机质含量等。这些因素都会对土壤蒸发产生影响。图 5 为 3 种不同宽度裂缝在经过不同回填处理后,土体裂缝的蒸发失水比对比图,由图 5 可知,经过不同回填技术处理后的裂缝的蒸发失水比均小于对照组。无裂缝对照组蒸发失水比为 0.92,与有裂缝无回填对照组的蒸发失水比关系表现为:$CK<CK_{Ⅰ}<CK_{Ⅱ}<CK_{Ⅲ}$。由此可以看出裂缝宽度对蒸发失水比也会产生影响。土壤蒸发对土壤水文过程产生重要影响,在影响土壤水分变化的同时也是作为干旱区植物指标评估的关键要素[22]。在裂缝Ⅰ中,各回填处理裂缝的关系表现为:$Ⅰ_1<Ⅰ_2<Ⅰ_3$,在裂缝Ⅱ中,各回填处理裂缝的关系表现为:$Ⅰ_1<Ⅰ_2<Ⅰ_3$,在裂缝Ⅲ中,各回填处理下裂缝的关系表现为:$Ⅰ_1<Ⅰ_2<Ⅰ_3$。在 3 组裂缝中,回填比例为 1∶1 的回填处理表现的蒸发失水比均为同组裂缝蒸发失水比的最小值。

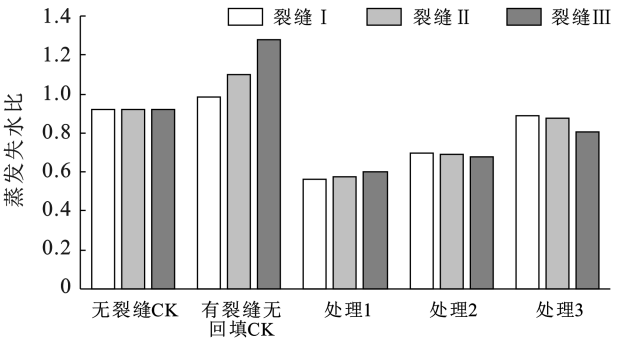

图 5　不同回填处理下 3 组裂缝的蒸发失水比

Fig.5　Evaporative water loss ratios of three group cracks under different backfill treatmens

3　讨 论

土壤水力性质对土壤水分分布状态和土壤水分循环产生重要影响[23]。裂缝使矿区地下水位下降,从而对土壤水分分布产生影响,土壤孔隙结构的改变会打破水循环的平衡,加剧土壤退化[24]。排土场土体裂缝会增加土壤水分蒸发甚至改变其理化性质[25],土壤稳定性减弱,影响植物存活率[26],从而对生态环境以及大气环境都造成影响。李果在研究采矿地裂缝回填研究中,通过 HYDRUS-1D 软件模拟,将风积沙、黄土、黏土和粉煤灰作为回填重构土,探究得出 1∶1∶1∶2 为最佳回填比例[27]。本研究选用的回填物质,不仅能对土体裂缝进行改善,还可以提高回填物的利用率。秸秆还田对土壤生态环境的影响主要体现在土壤物理性状、土壤养分和土壤生物性状 3 个方面。秸秆还田可以降低土壤容重、增加土壤孔隙度、改善土壤结构、提高土壤有机质含量、增加土壤微生物活性和酶活性[14]。秸秆覆盖可以达到蓄水、保水的效果[28]。

通过室内模拟蒸发试验对裂缝日蒸发量的趋势分析,土壤蒸发呈现明显的 3 阶段变化,祝晨佳[21]对土壤蒸发 3 阶段研究分为大气蒸发力控制阶段、土壤导水率控制阶段、水汽扩散控制阶段,这 3 个阶段是土壤含水量从饱和状态转为非饱和状态以及到含水率较低的情况下,蒸发率随着含水率的降低而下降,本试验在研究裂缝日蒸发量变化趋势中所呈现出土壤的规律与其结论一致。毕银丽[28]在研究采煤沉陷区的土壤水分入渗和蒸发特征中表明,采动地裂缝的存在会改变土壤的水分入渗和蒸发特性,裂缝宽度越大,其对土壤水分的影响范围也越大。本研究通过对 3 组裂缝的累积蒸发量的分析,随着宽度增加,其累积蒸发量也随之变大,刘继龙等[28]提出秸秆覆盖对土壤水分特性产生影响,土壤持水性会随着秸秆覆盖量的增加而增强。本研究裂缝在经过回填处理后,裂

缝的累积蒸发量变少，土壤与回填物比例为 1∶1 的回填处理 1 表现的累计蒸发量值最小。琚成远[30]在对裂缝表层含水量研究中提出宽度在 5 mm 以下的裂缝对土壤含水量影响不大，宽度在 9 mm 以上开始产生影响，且裂缝宽度越大，土壤含水量越低。经过回填处理后会使其含水量增加，可以保持土壤水分，减少水土流失的风险。土体裂缝会加快土壤水分的入渗和蒸发强度[31]，气象因素对土壤蒸发产生影响，温度对蒸发失水比会产生影响[32]。本研究中，土壤湿度、厚度、土壤含水率、裂缝宽度以及回填处理的比例都是本次室内模拟蒸发试验的影响因素。本研究在蒸发失水比在温度、湿度、光照等条件一定的情况下，探究蒸发失水比受裂缝宽度以及回填处理的影响，且回填比例为 1∶1 的处理蒸发失水比值最小。由此可见，回填比物与土壤比例需控制在一定范围内，才可对土体裂缝的蒸发产生积极作用。通过研究不同回填技术下土体裂缝的宽度以及回填物质比例对蒸发的影响，可为深入探究排土场土体裂缝影响下的水文侵蚀过程提供理论依据。

4 结 论

（1）3 组裂缝日蒸发量曲线变化趋势与对照组趋势相同，且都呈现出明显的 3 阶段蒸发规律，但不同回填技术对土体裂缝的日蒸发量影响效果无明显特征。随着裂缝宽度的增加，其累积蒸发量开始变大且在不同回填处理下裂缝的累积蒸发量随着回填物比例增大而减少。回填比例为 1∶1 的处理 1 累计蒸发量最小。

（2）土壤裂缝的出现及宽度增加会使土壤含水率减少，但 3 组裂缝中，经过回填处理后裂缝的含水率均高于有裂缝无回填对照组，回填比例为 1∶1 的处理 1 含水率均为最大值。

（3）裂缝宽度对裂缝的蒸发失水比产生影响，且经过回填处理裂缝的蒸发失水比均小于对照组，回填比例为 1∶1 的回填处理 1 蒸发失水比值最小。

参考文献(References)

[1] 赵军.探析煤矿采矿技术在应用过程中存在的问题[J].内蒙古煤炭经济，2021(16)：128-129.
Zhao Jun. Analysis on the problems existing in the application process of coal mining technology [J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2021(16)：128-129.

[2] 葛淑静.矿山地质环境影响预测评估与恢复治理研究[J].煤炭技术，2024，43(6)：160-164.
Ge Shujing. Research on mine geological environmental impact prediction assessment and restoration governance [J]. Coal Technology, 2024，43(6)：160-164.

[3] 张延旭，毕银丽，陈书琳，等.半干旱风沙区采煤后裂缝发育对土壤水分的影响[J].环境科学与技术，2015，38(3)：11-14.
Zhang Yanxu, Bi Yinli, Chen Shulin, et al. Effects of subsidence fracture caused by coal-mining on soil moisture content in semi-arid windy desert area [J]. Environmental Science & Technology, 2015，38(3)：11-14.

[4] 贺思楠.排土场平台—边坡系统土体裂缝对养分流失影响模拟研究[D].辽宁 阜新：辽宁工程技术大学，2022.
He Sinan. Simulation study on the influence of soil cracks on nutrient loss in waste dump platform slope system [D]. Fuxin, Liaoning: Liaoning Technical University, 2022.

[5] 李叶鑫，吕刚，王道涵，等.排土场土体裂缝特征对土壤物理性质的影响[J].干旱地区农业研究，2022，40(4)：214-222.
Li Yexin, Lv Gang, Wang Daohan, et al. Effects of ground fissure characteristics onsoil physical properties in the dump [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022，40(4)：214-222.

[6] 陈超，胡振琪.我国采动地裂缝形成机理研究进展[J].煤炭学报，2018，43(3)：810-823.
Chen Chao, Hu Zhenqi. Research advances in formation mechanism of ground crack due to coal mining subsidence in China [J]. Journal of China Coal Society, 2018，43(3)：810-823.

[7] 马施民，王洋，杨雯，等.山西煤矿潞安矿区地裂缝发育特征及形成机理分析[J].中国地质灾害与防治学报，2014，25(1)：28-32.
Ma Shimin, Wang Yang, Yang Wen, et al. Characteristics of ground fissures development and formation mechanism in Lu'an mining area, Shanxi Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014，25(1)：28-32.

[8] 李叶鑫，吕刚，王道涵，等.北方草原区露天煤矿外排土场平台土体裂缝形态特征[J].煤炭学报，2020，45(11)：3781-3792.
Li Yexin, Lü Gang, Wang Daohan, et al. Morphological characteristics of ground fissures at surface coal mine dump in northern grassland of China [J]. Journal of China Coal Society, 2020，45(11)：3781-3792.

[9] 贾晏泽.排土场土体裂缝不同回填技术下的水文过程[D].辽宁 阜新：辽宁工程技术大学，2022.
Jia Yanze. Hydrological Processes of soil cracks in coal mine dump under different backfilling techniques [D]. Fuxin, Liaonig: Liaoning Technical University, 2022.

[10] 赵文琦.生态脆弱区采矿地裂缝水分运移规律及精细回填技术研究[D].辽宁 阜新：辽宁工程技术大学，2022.

Zhao Wenqi. Study on water movement law and fine backfilling technology of mining ground fissures in ecologically fragile areas [D]. Fuxin, Liaonig: Liaoning Technical University, 2022.

[11] 李叶鑫,吕刚,王道涵,等.煤矿复垦排土场裂缝区土壤团聚体分布及稳定性[J].灌溉排水学报,2023,42(6):104-110.
Li Yexin, Lyu Gang, Wang Daohan, et al. Distribution and stability of soil aggregates over the fissure zones in reclaimed coal mining waste dumpsite [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023,42(6):104-110.

[12] 郭巧玲,马志华,苏宁,等.神府—东胜采煤塌陷区裂缝对土壤含水量的影响[J].中国水土保持科学,2019,17(1):109-116.
Guo Qiaoling, Ma Zhihua, Su Ning, et al. Effects of cracks in coal mining subsidence area on soil moisture content in Shenfu-Dongsheng coalfield [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019,17(1):109-116.

[13] 王辉,王清洲,付庆灵,等.秸秆还田深度对稻田土壤磷生物有效性的影响[J].中国土壤与肥料,2023(8):33-41.
Wang Hui, Wang Qingzhou, Fu Qingling, et al. Effects of straw returning depth on soil phosphorus bioavailability in paddy fields [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(8):33-41.

[14] 吴玉德,张旭,关法春,等.寒地水稻秸秆还田对土壤生态环境影响的研究进展[J].江苏农业科学,2023,51(15):1-8.
Wu Yude, Zhang Xu, Guan Fachun, et al. Research progress on effects of rice straw returning on soil ecological environment in cold region [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023,51(15):1-8.

[15] 武丽君,王朝旭,张峰,等.玉米秸秆和玉米芯生物炭对水溶液中无机氮的吸附性能[J].中国环境科学,2016,36(1):74-81.
Wu Lijun, Wang Chaoxu, Zhang Feng, et al. The adsorption characters of inorganic nitrogen in aqueous solution by maize straw-and corn cob-derived biochars [J]. China Environmental Science, 2016,36(1):74-81.

[16] 马正禄,郭蕊,黄坤,等.玉米秸秆填充改性聚乳酸复合材料的研究[J].山东化工,2024,53(2):24-26,29.
Ma Zhenglu, Guo Rui, Huang Kun, et al. Study on modified polylactic acid composites filled with corn straw [J]. Shandong Chemical Industry, 2024,53(2):24-26,29.

[17] 贾振江,刘学智,徐天渊,等.砂土混合覆盖下的土壤水分蒸发特性及其因子分析[J].水土保持学报,2023,37(2):227-236.
Jia Zhenjiang, Liu Xuezhi, Xu Tianyuan, et al. Analysis of soil water evaporation characteristics and its influencing factors under mixed sand cover [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(2):227-236.

[18] 杨婷,邢旭光,马孝义.凹凸棒土添加对土壤蒸发及裂缝特征的影响[J].应用生态学报,2022,33(8):2187-2195.
Yang Ting, Xing Xuguang, Ma Xiaoyi. Effects of attapulgite addition on soil evaporation and crack characteristics [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(8):2187-2195.

[19] 温欣,尚海丽,黄显武,等.不同沉陷应力区土壤水分和溶质运移的模拟试验[J].干旱区地理,2023,46(9):1481-1492.
Wen Xin, Shang Haili, Huang Xianwu, et al. Simulation experiment on soil moisture and solute transport in different subsidence stress regions [J]. Arid Land Geography, 2023,46(9):1481-1492.

[20] 冀宏,黄雄,郑健,等.不同覆盖条件对土壤水分蒸发的影响[J].节水灌溉,2010(4):29-32.
Ji Hong, Huang Xiong, Zheng Jian, et al. Effect of different mulching conditions on soil moisture evaporation [J]. Water Saving Irrigation, 2010(4):29-32.

[21] 祝晨佳,高吉喜.土壤蒸发影响因素及抑制途径研究综述[J].环境保护科学,2024,50(4):19-26.
Zhu Chenjia, Gao Jixi. A review of the factors affecting soil evaporation and its inhibition methods [J]. Environmental Protection Science, 2024,50(4):19-26.

[22] 华溢,陆彦玮,李敏,等.苹果树种植对黄土旱塬土壤蒸发的影响[J].干旱地区农业研究,2023,41(5):51-58.
Hua Yi, Lu Yanwei, Li Min, et al. Effects of apple tree planting on soil evaporation in the Loess tableland [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023,41(5):51-58.

[23] 刘斐耀,尤全刚,薛娴,等.民勤荒漠绿洲过渡带黏土夹层水力性质及其生态水文意义探讨[J].干旱区资源与环境,2024,38(1):114-122.
Liu Feiyao, You Quangang, Xue Xian, et al. Hydraulic properties and eco-hydrology effects of clay interlayer in oasis-desert ecotone of Minqin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019,38(1):114-122.

[24] Borůvka L, Kozák J, Mühlhanselová M, et al. Effect of covering with natural topsoil as a reclamation measure on brown-coal mining dumpsites [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012,113:118-123.

[25] 匡文龙,邓义芳.采煤塌陷地区土地生态环境的影响与防治研究[J].中国安全科学学报,2007,17(1):116-120.
Kuang Wenlong, Deng Yifang. Probe into the soil environmental impact of coal mining collapsed area and its prevention and cure measures [J]. China Safety Science Journal (CSSJ), 2007,17(1):116-120.

[26] 李禹凝,王金满,张雅馥,等.干旱半干旱煤矿区土壤水分研究进展[J].土壤,2023,55(3):494-502.
Li Yuning, Wang Jinman, Zhang Yafu, et al. Soil water in arid and semi-arid mining areas: A review [J]. Soils, 2023,55(3):494-502.

[27] 李果.生态脆弱区采矿地裂缝精细回填技术研究[J].煤炭工程,2022,54(11):157-163.
Li Guo. Fine backfilling technology of mining ground fissures in ecologically fragile areas [J]. Coal Engineering, 2022,54(11):157-163.

[28] 毕银丽,刘京,尚建选,等.陕北采煤沉陷区土壤水分入渗和蒸发特征研究[J].中国矿业大学学报,2022,51(5):839-849.
Bi Yinli, Liu Jing, Shang Jianxuan, et al. Study on the characteristics of soil moisture infiltration and evaporation in the coal mining subsidence area of coal mines in Northern Shaanxi [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022,51(5):839-849.

[29] 刘继龙,李佳文,周延,等.秸秆覆盖与耕作方式对土壤水分特性的影响[J].农业机械学报,2019,50(7):333-339.
Liu Jilong, Li Jiawen, Zhou Yan, et al. Effects of straw mulching and tillage on soil water characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(7):333-339.

[30] 琚成远,浮耀坤,陈超,等.神南矿区采煤沉陷裂缝对土壤表层含水量的影响[J].煤炭科学技术,2022,50(4):309-316.
Ju Chengyuan, Fu Yaokun, Chen Chao, et al. Influence of coal mining subsidence cracks on soil surface water content in Shennan Mining Area [J]. Coal Science and Technology, 2022,50(4):309-316.

[31] Novák V. Soil-crack characteristics: Estimation methods applied to heavy soils in the NOPEX area [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999,98:501-507.

[32] 孔凡丹,周利军,郑丽颖,等.秸秆覆盖对土壤水热效应及水分利用效率的影响[J].绥化学院学报,2024,44(3):151-153.
Kong Fandan, Zhou Lijun, Zheng Liying, et al. Effects of straw mulching on soil hydrothermal effect and water use efficiency [J]. Journal of Suihua University, 2024,44(3):151-153.

(上接第189页)

[23] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. Earth System Science Data, 2021,13(8):3907-3925.

[24] 周德,徐建春,王莉.环杭州湾城市群土地利用的空间冲突与复杂性[J].地理研究,2015,34(9):1630-1642.
Zhou De, Xu Jianchun, Wang Li. Land use spatial conflicts and complexity: A case study of the urban agglomeration around Hangzhou Bay, China [J]. Geographical Research, 2015,34(9):1630-1642.

[25] Besag J, York J, Mollié A. Bayesian image restoration, with two applications in spatial statistics [J]. Annals of the Institute of Statistical Mathematics, 1991,43(1):1-20.

[26] Goldstein H, Browne W, Rasbash J. Partitioning variation in multilevel models [J]. Understanding Statistics, 2002,1(4):223-231.

[27] 季建万,姜琳琳,刘文亮,等.基于多参数优选地理探测器的京津冀城市群地质灾害影响因子分析[J].地理与地理信息科学,2023,39(2):39-45.
Ji Jianwan, Jiang Linlin, Liu Wenliang, et al. Analysis on influence factors of geological hazards in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on multi-parameters optimized by geodetector [J]. Geography and Geo-Information Science, 2023,39(2):39-45.

[28] 肖建英,戴津津,方昕然,等.基于PLUS模型的徐州市生态系统服务价值多情景模拟研究[J].中国土地科学,2024,38(4):125-134.
Xiao Jianying, Dai Jinjin, Fang Xinran, et al. Multiple scenario simulation of ecosystem service value in Xuzhou City based on PLUS model [J]. China Land Science, 2024,38(4):125-134.

[29] 毛永发,周启刚,王陶,等.耦合PLUS-InVEST-Geodector模型的三峡库区碳储量时空变化及其定量归因[J].长江流域资源与环境,2023,32(5):1042-1057.
Mao Yongfa, Zhou Qigang, Wang Tao, et al. Spatial-temporal variation of carbon storage and its quantitative attribution in the Three Gorges reservoir area coupled with PLUS-In VEST geodector model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023,32(5):1042-1057.

[30] Richardson S, Thomson A, Best N, et al. Interpreting posterior relative risk estimates in disease-mapping studies [J]. Environmental Health Perspectives, 2004, 112(9):1016-1025.