

王计磊, 李子忠. 东北黑土区水力侵蚀研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(5):389-397.

WANG Ji-lei, LI Zi-zhong. Research progress on water erosion in the black soil region of northeast China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(5): 389-397.

## 东北黑土区水力侵蚀研究进展

王计磊, 李子忠\*

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

**摘要:**水力侵蚀是我国东北黑土区主要土壤侵蚀类型,为更加有效地防治黑土区水力侵蚀,保护当地生态安全,推进我国生态文明建设,我国学者开展了一系列研究,涉及到黑土区水力侵蚀发生机理、影响因素、预测预报技术以及防治措施等方面,取得了可观成果。本文总结了近年来东北黑土区水力侵蚀的研究成果,认为目前黑土区水力侵蚀研究较为全面、深入,但还有一些需要进一步深入的研究领域:水力侵蚀机理的定量化研究、水力侵蚀效应系统评价研究、黑土区水力侵蚀预测预报研究和黑土区水力侵蚀综合防治体系研究。

**关键词:**黑土区;坡面侵蚀;影响因素;效应评价

中图分类号:S157.1

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)05-0389-09

doi: 10.13254/j.jare.2017.0328

### Research progress on water erosion in the black soil region of northeast China

WANG Ji-lei, LI Zi-zhong\*

(College of Resources and Environment, China Agriculture University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** The black soil region in northeast China is an important grain base. Water erosion is the main type of soil erosion in the area and increasingly severe which has become one of the most significant factors threatening the food security. To more effectively prevent water erosion, better protect the local ecological security and further promote the construction of ecological civilization, a series of studies were conducted in black soil region of northeast China, including the mechanism, forces, prediction techniques and prevention measures of water erosion in black soil area, have achieved fruitful results. On the purpose of clarifying the existing research results and contributing to the future research on water erosion in black soil region, this review summarized the progress on the water erosion in black soil region of northeast during recent years and found although the current water erosion researches in black soil region were profound and comprehensive, in-depth researches should be further explored in some areas such as quantitative expression on the process of water erosion, systematic assessment of the effect of water erosion, the establishment of prediction model related to water erosion and the integrated management system for water erosion in black soil region of northeast China.

**Keywords:** black soil region; slope erosion; influencing factors; effect evaluation

东北黑土区位于中国大陆的东北部,包括辽宁省、黑龙江省、吉林省及内蒙古自治区部分地区,总土地面积 103 万 km<sup>2</sup>,是我国重要的商品粮生产基地,由

于长期以来不合理的开发利用,致使该区水力侵蚀广泛发生,已成为我国五大水力侵蚀区之一<sup>[1]</sup>,第三次遥感调查统计资料显示,东北黑土区水力侵蚀面积 18.27 万 km<sup>2</sup>,占总面积的 17.7%,其中辽宁省、黑龙江省、吉林省及内蒙古自治区水力侵蚀面积分别为 2.99 万、8.88 万、1.76 万 km<sup>2</sup>及 4.64 万 km<sup>2</sup>,重度侵蚀面积分别为 2 493.9、3 329.8、1 393.2 km<sup>2</sup>及 64.0 km<sup>2</sup>,黑龙江省水力侵蚀面积及强度最大(图 1)<sup>[2]</sup>。坡耕地是黑土区水土流失的主要策源地<sup>[3]</sup>,坡耕地水土流失面积

收稿日期:2017-12-20 录用日期:2018-03-19

基金项目:国家重点研发计划粮食丰产增效科技创新重点专项(2016YFD0300203-5);中央高校基本科研业务费专项(2017XS002)

作者简介:王计磊(1991—),男,河南新乡人,博士研究生,主要研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: wjlei123@cau.edu.cn

\*通信作者:李子忠 E-mail: zizhong@cau.edu.cn

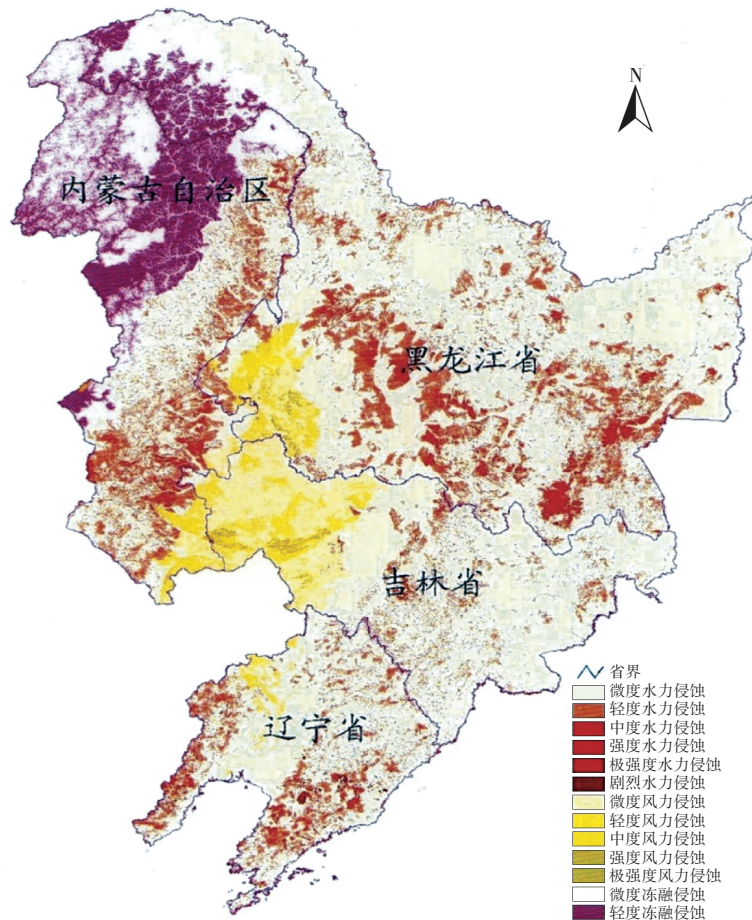


图1 东北黑土区土壤侵蚀类型及强度分布图

Figure 1 The spatial distribution map of soil erosion types and intensity in black soil region of northeast China

占黑土区水土流失总面积的46.39%,严重的水土流失不仅造成土地生产力减退,同时也会引发一系列环境问题,威胁粮食及生态安全<sup>[4]</sup>,进行黑土区水力侵蚀研究,促进黑土地资源保护与可持续利用,将有利于改善黑土区生态环境,保障黑土区人民生活条件。

东北黑土区水力侵蚀问题受到广泛关注,一系列水力侵蚀相关研究也相继开展,其涉及范围广、层次比较深入,成果较为突出。东北黑土区水力侵蚀研究主要集中在侵蚀发生机理研究、侵蚀效应评价研究、侵蚀预测预报研究及侵蚀防治措施研究4个方面。本文从这4个方面将黑土区水力侵蚀研究最新成果进行总结,分析水蚀研究现状,阐述今后可进一步加强的研究,以期在黑土区水力侵蚀的研究及防治提供参考,促进黑土区生态环境健康发展。

## 1 黑土侵蚀机理研究

黑土区水力侵蚀形式主要包括溅蚀、面蚀和沟

蚀,溅蚀是坡面水力侵蚀的最初阶段,雨滴击溅破坏表层土壤结构,造成土壤孔隙堵塞,降低土壤入渗作用,加速地表径流的产生,地表形成薄层径流后会对坡面表层土壤整体进行侵蚀,随着径流的增多,坡面细沟变深加宽,地表径流逐渐向沟内集中,坡面土壤侵蚀加剧,这个过程就称为沟蚀。研究雨滴溅蚀、面蚀及沟蚀发生特点、影响因素是全面认识黑土区水力侵蚀机理的核心环节,也是准确掌握和预测侵蚀发生发展过程、布置防治措施的基础。

### 1.1 溅蚀机理

雨滴击溅侵蚀是坡面水力侵蚀的最初阶段,雨滴打击力是溅蚀发生的原动力<sup>[5]</sup>,常发生于地表裸露处,过程中土壤结构遭到破坏,土壤孔隙被细小颗粒堵塞,造成入渗速率降低,促进地表径流的形成<sup>[6]</sup>,为面蚀和沟蚀的发生提供了条件<sup>[7]</sup>,量化黑土坡面溅蚀发生过程,明晰溅蚀在整个侵蚀过程中发挥的作用,有助于深刻剖析黑土区侵蚀发生机理,评价侵蚀各发展阶段对整个过程的贡献。

黑土区溅蚀研究成果的报道相比面蚀与沟蚀研究数量偏少,且多集中在溅蚀发生特点、影响因素等方面(表1)。溅蚀盘是溅蚀研究最常用的试验装置,周一杨等<sup>[8]</sup>采用人工模拟降雨和溅蚀盘装置对东北典型黑土区溅蚀特征进行分析,其研究表明,当降雨强度大于 $45.63\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,溅蚀量与降雨历时表现出良好的 Logistic 生长曲线函数关系,降雨历时 $11.30\text{ min}$ 为干土溅散和泥浆溅散的分界点,降雨历时超过 $40.83\text{ min}$ 溅蚀率逐渐降低,这主要因为地表薄层径流对雨滴有削能作用,减缓了雨滴击溅作用。土壤理化性质是影响溅蚀的一个重要因素,黑土有机质含量较高,稳定性强,一般情况下较黄土和紫色土发生程度轻<sup>[9]</sup>。而卜崇峰等<sup>[10]</sup>用溅蚀盘法测定了黄土、紫色土、黑土土壤结皮发育过程中土壤累积溅蚀量的变化特征,结果表明黑土溅蚀发生比较晚,但是随着降雨历时的增加,其累积溅蚀量增长率高于黄土和紫色土,这说明黑土在降雨初期表现出的抗雨滴击打能力较强,但有一个阈值,当外界条件超过这个阈值时,黑土抗雨滴击打能力可能就弱于其他土壤。胡伟<sup>[11]</sup>研究发现,在一定条件下,随着降雨历时的增加,溅蚀率迅速增加,同时,溅蚀量受降雨能量影响显著,根据观测到的结果,建立并验证了土壤溅蚀量预报模型,方程如下:

$$S_p=0.040K^{0.17}K_E^{3.05}D_{50}^{0.06} \quad (1)$$

式中: $S_p$ 为溅蚀量, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ;  $K$ 为土壤可蚀性, $\text{t}\cdot\text{hm}^2\cdot\text{h}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ ;  $K_E$ 为降雨能量, $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ ;  $D_{50}$ 为雨滴中数直径,mm。

黑土区坡面坡度多在 $1^\circ\sim5^\circ$ 之间,坡长可达几百米甚至上千米,为降雨雨滴冲击及径流产生提供了良好的下垫面,土壤侵蚀多发,范昊明等<sup>[12]</sup>研究将黑土区坡面分为岗顶溅蚀带、面蚀加强带、面蚀强烈带、面蚀减缓带和坡下沉积带五个区域。通过近年来的研究,在黑土区溅蚀的发生特征、机理及防治措施等方面都取得了一定的进展,但要全面分析溅蚀的发生条

件、发生特征、在整个侵蚀中所处的地位还有很多工作要做,比如很多溅蚀研究是在室内模拟情况下进行的,但在自然降雨条件下的发生特点、过程、侵蚀量及影响因素还不十分明确,而且溅蚀研究结果随空间、时间、试验条件的变化而产生的变异特别大,全面认识溅蚀发生规律、量化溅蚀影响因素及其在整个侵蚀过程中发挥的作用还有待进一步研究,这也是今后研究的重点。

1.2 面蚀与沟蚀机理

面蚀与沟蚀是水力侵蚀破坏土壤资源,造成土地退化的主要发生方式,其引起的土壤流失量占水力侵蚀土壤流失总量的大部分,对土地生产力、生态环境都有严重危害,所以面蚀和沟蚀发生特征、影响因素是坡面侵蚀发生机理研究的重点,也是坡面侵蚀防治的基础。黑土区涉及范围较广,不同区域地理环境、人文特征等均不相同<sup>[13]</sup>,坡面侵蚀发生程度空间差异较大,有调查显示,黑龙江省侵蚀沟总数达 $115\,516$ 条,其中 $99.73\%$ 分布于水蚀区<sup>[16]</sup>。2008—2013年,拜泉县侵蚀沟数量由 $2502$ 条增至 $3712$ 条,增加了 $48.36\%$ <sup>[17]</sup>。辽宁省2015年侵蚀沟数量为 $54\,477$ 条,较2010年增加 $15.43\%$ ,辽西为侵蚀沟高发区<sup>[18]</sup>。吉林省侵蚀沟数量为 $62\,978$ 条,而内蒙古自治区侵蚀沟数量较吉林省高,为 $69\,957$ 条,但黑土区四省(区)沟壑密度表现为内蒙古最大,其次为辽宁和吉林,黑龙江最低<sup>[19]</sup>。总体来讲,东北黑土区侵蚀沟主要分布在坡耕地上<sup>[20]</sup>,切沟发育阶段对沟道侵蚀量贡献最大,可达 $92.35\%$ <sup>[21]</sup>。坡面侵蚀主要受降雨因素、地形因素、植被因素、土壤因素以及人类活动因素影响,深入研究这些因素如何影响坡面侵蚀的发生、发展,对掌握水力侵蚀发生机理,预防水力侵蚀危害,保护黑土区生态环境有重要意义。现在常采用资料查阅分析、野外实地调查、利用3S技术辅助分析及模拟降雨试验等手段来研究水力侵蚀发生机理。

表1 黑土区溅蚀研究进展

Table 1 The research progress on splash erosion in black soil region of northeast China

| 研究区       | 研究内容                | 研究方法   | 主要结论                                        | 参考文献                  |
|-----------|---------------------|--------|---------------------------------------------|-----------------------|
| 黑龙江省黑河市   | 长坡坡面侵蚀产沙特征          | 野外定位观测 | 长坡坡面顶部7 m区域为溅蚀区                             | Cui等 <sup>[13]</sup>  |
| 黑龙江省拜泉县   | 几种典型土壤雨滴溅蚀特征对比      | 人工模拟降雨 | 土壤溅蚀速率与降雨强度呈显著性正相关,土壤有机质含量与土壤溅蚀量呈负相关        | Cheng等 <sup>[9]</sup> |
| 黑龙江省克山农场  | 模拟降雨条件下黑土溅蚀与团聚体分选特征 | 人工模拟降雨 | 溅蚀量以及净迁移量与溅蚀距离呈指数递减关系;粒级大于5 mm的团聚体在溅蚀过程中未迁移 | 周一杨等 <sup>[8]</sup>   |
| 黑龙江省鹤山农场  | 土壤结皮对溅蚀的影响          | 人工模拟降雨 | 土壤结皮对溅蚀有增强作用                                | Bu等 <sup>[14]</sup>   |
| 吉林省榆树市刘家镇 | 降雨能量对坡面溅蚀的影响        | 人工模拟降雨 | 向侧坡溅蚀量与降雨能量呈二次多项式关系;其他方向溅蚀量及溅蚀总量与降雨能量呈幂函数关系 | 胡伟 <sup>[11]</sup>    |

(1)降雨因素。降雨是水力侵蚀发生的动力因素,降雨通过降雨强度、降雨历时等因素的不同来影响水力侵蚀的发展<sup>[22]</sup>。黑土区降雨主要集中在每年6—9月份,且多为短历时强降雨,这为黑土区坡面侵蚀的发生提供了足够的动力源。一般将能够产生地表径流、引起侵蚀的降雨量称为侵蚀性降雨,将降雨引起土壤侵蚀的潜在能力称为降雨侵蚀力。黑土区范围广,地域间土壤性质存在一定的空间变异,各地侵蚀性降雨标准不太一致,高峰等<sup>[23]</sup>通过统计分析认为黑土耕地侵蚀性降雨雨量基本标准为8.9 mm,一般雨量标准为11.6 mm。张宪奎等<sup>[24]</sup>在分析大量资料的基础上,总结了黑龙江地区降雨侵蚀力的计算方法:

$$R=E_{60} I_{30} \quad (2)$$

式中: $R$ 是一次降雨的侵蚀力, $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ;  $E_{60}$ 是一次降雨60 min最大降雨产生的动能, $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ ;  $I_{30}$ 为一次降雨30 min最大降雨强度, $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

坡面侵蚀与降雨因素之间关系比较复杂,其发展过程以及结果受到雨强、雨型及降雨历时等因素的影响与制约,尤其是在自然降雨条件下,雨强并不是稳定的,即雨型是变化的,固定雨强的人工模拟降雨试验不能很好地反应自然状态下的土壤侵蚀发生规律。郑粉莉等<sup>[25]</sup>采用人工模拟降雨试验,研究了雨型对黑土区顺坡垄作坡面侵蚀的影响,研究结果显示雨型对侵蚀作用有重要影响,且起始阶段雨强大小与总径流量和总侵蚀量关系密切。乔治等<sup>[26]</sup>研究指出,黑土区侵蚀沟数量与多年平均最大1 h降雨量呈正相关关系,但与多年平均最大6 h和最大24 h降雨量不是单一的相关关系,随着降雨量的增加呈先增多后减少的趋势。而随着降雨历时的增加,径流系数与侵蚀速率渐趋稳定,径流量随降雨强度呈显著正相关关系,但侵蚀泥沙量则仅在一定的雨强范围内,才表现出正相关关系<sup>[22]</sup>。降雨与侵蚀的关系,其实是雨滴到达地面与土壤发生作用的一个过程,量化作用过程及机理还需要更为微观的研究,另外,降雨对坡面的作用也受外界条件的影响,如风、地表覆盖等,地表植被对降雨有承接、分流等作用。对降雨再分配后的各部分动力学参数以及引起侵蚀的量化分析等,目前还鲜有报道,有待进一步深入研究。

(2)地形因素。地形因素是影响坡面侵蚀发生发展的一个重要条件,主要通过坡长、坡度和坡形等因子影响下垫面的形态,从而影响雨滴对坡面的打击角、汇流面积的大小以及径流冲刷等过程。黑土区坡面多为长缓坡,虽然坡度不大,但因汇流面积较大,为

降雨作用提供了很好的下垫面,所以土壤侵蚀比较严重,但不同区域侵蚀的发育与地形因子间的数量关系表现出一定的空间变异。许晓鸿等<sup>[27]</sup>对吉林省6个典型区沟壑密度与地形进行分析,结果表明沟壑密度随集水面积的增加呈现出先增加后减小的趋势,临界集水面积为29.39  $\text{hm}^2$ 。坡度主要影响地表土壤与雨滴的接触角、地表径流流速及径流对地表土壤的剪切力,土壤侵蚀速率一般随坡度的增加呈先增加后减小的趋势,有研究<sup>[17,28]</sup>指出黑土区坡面坡度为 $3^\circ\sim5^\circ$ 时,坡面沟壑密度最大。而黑土区沟壑密度与坡长的关系也表现随坡长的增加先升高后降低的趋势,但不同地区临界坡长有一定的差异,许晓鸿等<sup>[21]</sup>研究发现吉林省梅河口市沟壑密度在坡长200~299 m内最大,而顾广贺等<sup>[29]</sup>通过分析东北漫川漫岗区典型小流域侵蚀沟发育特征发现,该区域沟壑密度发育的临界坡长为900 m。目前有关黑土区地形因子与坡面侵蚀关系的研究均是在不同区域内分别进行的,而各研究区域量化结果不太一致,造成这些空间变异的因素有很多,有必要综合分析不同区域地形因素对坡面水力侵蚀的影响,从而探讨更为接近本质的机理,这对全面认识坡面水力侵蚀的发生特征、预测手段和防治方法都有积极意义。

(3)植被、土壤及人类活动因素。水力侵蚀的发生发展是降雨与其他因素相互作用的结果,其中与植被、土壤等因子有密切关系,这些因子在一定程度上受人类活动的影响,如土地利用类型、耕作措施会对植被覆盖、地表形态及土壤理化性质产生影响。Ouyang等<sup>[4]</sup>研究了土地利用方式和土壤性质变化对土壤侵蚀的影响,结果表明土地利用方式会直接影响土壤性质,进而影响土壤侵蚀的发生,如旱地土壤侵蚀程度较重,而稻田、林地土壤侵蚀程度则较轻,城区建设也在一定程度上抑制了水土流失的发生。植被对坡面有一定的保护作用,植被冠层可以缓冲降雨,根系可以固持土壤,枯落物也可以作为缓冲层。土壤作为水力侵蚀的对象,土壤状态直接决定着水力侵蚀发生的过程与程度。而随着人类社会的不断发展,人们对自然资源的开发以及其他活动都会对环境产生影响,加剧侵蚀的发生,而另一方面,人们修建水平梯田,植树种草以及建坝蓄水等工程的实施,又会对生态环境产生积极影响,保护土地,减少侵蚀的发生。定量分析水力侵蚀与植被、土壤及人类活动等因素的关系有助于深入剖析水力侵蚀的发生机理,从而更有效地防治水力侵蚀。新中国成立以来,东北黑土区农村生产

关系经历了四次比较大的调整,这对当地农业的开发利用产生了较大的影响,林地、草地、湿地减少,农地增加,加剧了侵蚀的发生,而稻田和城区面积的扩增,相关水土保持措施的布设<sup>[30]</sup>,又在一定程度上降低了侵蚀的程度,在这个过程中土壤状态也发生着改变,它们与侵蚀的关系是相互作用、相互联系的<sup>[4,26,31]</sup>。人类活动是这些变化的主导因子,正确评价和理解人类活动对水力侵蚀的影响是掌握水力侵蚀发生机理的结果,也是规范人类活动、减少其对生态产生不良影响、促进人与自然和谐发展的基础。

坡面侵蚀是一个复杂的过程,侵蚀发展过程中也包含着不同侵蚀形式,如溅蚀、面蚀、沟蚀可能会同时存在,它们共同受到降雨、土壤、植被等因素的影响,而水力侵蚀机理研究就是探讨这些侵蚀形式的发生原因、过程及影响因素,为预测水力侵蚀发生发展、评价水力侵蚀危害及水力侵蚀防治提供理论指导。水力侵蚀影响因素研究是机理研究的一个核心环节,但各因素间通常是相互作用的,量化研究这些因素的相互作用,如各因子间如何作用、因子之间又是怎样的关系、各个因子对水力侵蚀发生的贡献率等现在还不是特别清楚,也是接下来的研究必须解决的。另外,黑土区水力侵蚀也常与其他侵蚀形式一起发生,即多营力共同作用引起的土壤侵蚀,如在一些区域水力侵蚀常与冻融侵蚀共同作用。研究复合营力作用下的侵蚀机理,有利于科学掌握东北黑土区水力侵蚀及其他侵蚀形式的发生规律,并根据其发生特征有针对性地进行布设防治措施。

## 2 水力侵蚀效应评价研究

坡面水力侵蚀的发生会对土壤肥力、生态环境等产生怎样的直接影响?又会引发哪些间接反应?这些效应应该怎样量化?要回答这些问题,就要对水力侵蚀开展效应评价。水力侵蚀的发生过程可以简化为“水冲土跑”,中间也存在与其他环境因素的作用,其间水作为介质、泥沙作为载体,水力侵蚀会造成土壤以及养分的损失。由于地表径流会首先带走土壤的细小颗粒,而细小颗粒的比表面积较大,吸附的营养较多,细小颗粒的流失不仅会导致坡面土壤粗化、降低土壤养分含量、破坏土地生产力,同时携带有大量养分的径流进入河流、湖泊,也会造成水体富营养化,引起一系列的环境效应,水力侵蚀效应评价研究是量化水力侵蚀作用特点和危害方式的基础,在研究中也常用坡面产沙量及侵蚀对作物产量、

土地肥力等方面的影响来定量评价水力侵蚀效应<sup>[32-37]</sup>。

黑土是一种宝贵的土壤资源,其有机质含量高、养分丰富,是东北黑土区成为我国商品粮生产基地的一个重要因素。受土壤侵蚀及其他因素的影响,东北黑土区黑土层已经变薄甚至出现了破皮黄或消失现象,方海燕等<sup>[32]</sup>研究指出水力侵蚀是造成黑土区坡面土壤有机碳流失的主要因素,土壤侵蚀速率与土壤有机质含量呈显著性负相关关系( $P<0.05$ ),同时水力侵蚀也造成土壤大量氮素营养的损失<sup>[33]</sup>,而这些流失的营养也会危害当地水体安全。魏守才<sup>[34]</sup>研究结果表明,黑土区有机碳运移主要以侵蚀泥沙为载体,且泥沙运移以土壤细小颗粒为主,长期的土壤侵蚀会造成坡耕地坡面中上部土壤的退化。随着降雨强度的增加,地表径流携带土壤大团聚体含量会增加,加剧了土壤结构的破坏作用<sup>[22]</sup>,也会造成土壤其他理化性质的改变<sup>[35]</sup>,其直观结果就是土壤质量下降,土地生产力降低,作物减产<sup>[36-37]</sup>。

水力侵蚀所产生的效应是复杂的、综合的,水力侵蚀效应评价也应全方位、多层次进行,将对不同尺度各要素的影响综合起来,从时间、空间上共同评价黑土区水力侵蚀产生的生态、经济和社会效应,为针对性预防水力侵蚀不良效应,促进黑土区生态、经济及社会可持续发展提供参考。

## 3 水力侵蚀预测预报方法研究

“预防为主,防治结合”是防治水土流失的基本原则,水力侵蚀预测预报在水力侵蚀防治中起着重要作用。目前黑土区水力侵蚀预测预报方法研究主要包括以下三个方面:

(1)开发东北黑土区土壤侵蚀预报模型。土壤侵蚀预测预报模型是以大量试验研究为基础,通过对试验规律及各相关因子的分析总结,用数学方法预测土壤侵蚀的过程及结果。现有的土壤侵蚀预报模型在地区适用性方面都有一定的局限性,所以建立适用于黑土区的土壤侵蚀预测预报模型是十分必要而有意义的,相关学者们也为此进行了大量工作,如张宪奎等<sup>[24]</sup>在通用土壤流失方程(USLE)的基础上,利用大量试验数据,对USLE的各因子进行了修正,建立了黑龙江土壤流失方程。胡刚等<sup>[38]</sup>通过对东北漫岗黑土区实地测量和地形图量算,建立了浅沟和切沟临界发生模型( $S=0.063\ 1A^{-0.464\ 3}$ ,  $S$ 为局部坡度,  $A$ 为汇水面积),通过与浅沟、切沟实际发生位置的对比,能够很

好地反映野外实际情况,但开发普遍适用于黑土区的土壤侵蚀预报模型,仍有许多工作要做。

(2)对已有水蚀模型进行东北黑土区适用性评价。国际上已有多种较为成熟的水蚀模型,如WEPP等<sup>[39]</sup>,将这些水蚀模型进行黑土区适用性评价,有助于提高水力侵蚀预报精度及相关预防措施的布设,刘远利<sup>[40]</sup>通过观测流域径流小区产沙数据,对WEPP模型在东北黑土区的实用性进行评价,指出WEPP模型对土壤侵蚀的模拟较好,对免耕、少耕或裸地条件下的径流量模拟效果好于坡面侵蚀量,对大豆和苜蓿草生长条件下坡面径流模拟结果偏大,侵蚀泥沙量模拟结果偏小。也有学者利用<sup>137</sup>Cs示踪技术对黑龙江省拜泉县土壤侵蚀强度进行分析,并用其数据对WaTEM/SEDEM模型的参数进行校正,并用小流域产沙数据进行验证,结果表明WaTEM/SEDEM模型对黑土区年产沙量和产沙模数的模拟结果较好,此模型在黑土区小流域侵蚀产沙量预测等方面有很好的应用前景<sup>[41]</sup>。尽管有多个适用性较广的土壤侵蚀预报模型,但在黑土区的预报精度还有一定的限制,积极进行水蚀模型适用性评价,筛选能够适用于黑土区的水蚀模型,为黑土区水力侵蚀预测预报提供多方面支持,有助于提升预报效率,降低水力侵蚀危害。

(3)利用3S技术对东北黑土区土壤侵蚀特征进行监测。3S技术的发展推动了区域尺度下土壤侵蚀研究,为区域土壤侵蚀的动态监测、模拟及预警提供了强大的技术支持,在科研工作中得到了广泛的应用<sup>[42]</sup>。邢宇等<sup>[43]</sup>利用1986年和2001年的遥感影像,分析了松辽平原的土壤侵蚀状况并就侵蚀发展趋势进行预测,而王文娟等<sup>[44]</sup>利用RS和GIS技术,筛选影响东北黑土区乌纳河流域侵蚀沟发育的地理环境因子,建立评价沟蚀发生风险的Logistic模型,并绘制流域沟蚀发生风险分布图,这对区域沟蚀针对性防治有积极意义。

虽然现在有很好的侵蚀预测预报及监测手段,并得到了广泛的应用,但其也都有相应的局限性,研究适用于整个黑土区的水力侵蚀预测预报模型,如不同尺度的侵蚀产沙预报模型、侵蚀沟发育预报模型、侵蚀沟不同发育阶段侵蚀产沙速率预报模型等,对黑土区水力侵蚀的研究与防治都有重要的科学价值与现实意义,同时也应加大3S技术相关成果转化,扩大3S技术在土壤侵蚀监测方面的应用,从而将理论预报与实际监测相结合,提高监测效率,有效预防坡面侵蚀的发生。

## 4 水力侵蚀防治措施研究

水土保持措施可以分为水土保持工程措施、生物措施和耕作措施三类,东北黑土区具有其独特的侵蚀产沙环境,水力侵蚀防治措施种类较多,各地域措施布设存在一定的差异。科学评价各措施的作用效果,有助于最佳的防治体系的筛选,同时加强水土保持新措施的研究,将水力侵蚀预测与防治有效对接,促进区域水力侵蚀防治良性循环<sup>[45]</sup>。防护林带是黑土区坡耕地防护措施的重要组成部分,苏子龙等<sup>[46]</sup>调查分析了漫岗黑土区防护林带对浅沟侵蚀的影响,结果表明增加林带个数、减小林带间距可增大临界坡长和临界汇水面积,合理布设防护林带,可有效防治浅沟侵蚀。孙莉英等<sup>[47]</sup>以通双小流域近50年水土保持综合治理实践和数据为基础,对小流域从坡顶到沟道设置三道防线治理模式的水土保持机理和效益进行分析,认为该三道防线是适合漫川漫岗水力侵蚀区的模式治理体系。在具体坡面防护措施方面,陈光等<sup>[48]</sup>通过径流小区试验对比分析,认为水平梯田保土效果最好,可减少99.5%的土壤侵蚀量,而地埂植物带、水平坑措施及荒山荒坡灌木埂三种措施作用效果相当,可减少80%以上的土壤侵蚀量。留茬、轮作和秸秆还田是黑土区常见的耕作措施,许晓鸿等<sup>[49]</sup>研究发现三种措施可分别减少36.4%~66.7%的地表径流及75.2%~86.4%的侵蚀泥沙,其中以秸秆还田措施减水减沙效果最佳。虽然黑土区水力侵蚀防治措施是多样的,但系统评价现有防治措施的防治效果、完善已建立的综合防治体系及研发新技术新体系等工作仍需加强,同时也应因地制宜地对黑土区不同区域提出相应的防治体系,使区域水力侵蚀防治措施向特色化、标准化方向发展。

## 5 展望

综上所述,东北黑土区水力侵蚀研究成果丰富,涉及到机理、效应、预测预报及防治措施等多个方面,现有成果虽然进一步完善了黑土区水力侵蚀的研究,但由于黑土区水力侵蚀发生面积较广,影响因素复杂,有很多问题探讨得还不是很透彻,比如坡耕地作为黑土区水力侵蚀的主要发生地,目前针对坡耕地水力侵蚀的发生机理、规律及防治措施研究多采用模拟降雨试验或小流域监测的方法,不同地区野外原位观测坡耕地径流侵蚀产沙规律的研究很少。在今后的黑土区水力侵蚀研究中,可进一步加强以下4个方面的研究:

(1)水力侵蚀机理的定量化研究。①溅蚀、面蚀、沟蚀发生发展过程的定量表达。②降雨、地形等因素影响溅蚀、面蚀、沟蚀发生发展临界值的研究,以及各因素的互作对水力侵蚀的影响机理,如主导溅蚀、面蚀、沟蚀发生发展的水动力学机理研究等。

(2)水力侵蚀效应系统评价研究。从不同时间和空间尺度,对水力侵蚀产生的各方面(生态、社会和经济等)效应进行系统评价,如可将坡面和流域尺度结合起来,从坡面泥沙、养分变化及对流域土地生产力、下游水体污染、河道形态等方面的影响着手,将对更好地理解水力侵蚀发生机理及附加效应,有针对性地降低水力侵蚀危害产生积极意义。

(3)黑土区水力侵蚀预测预报研究。如开发适用黑土区不同尺度的侵蚀产沙预报模型、侵蚀沟发育预报模型、侵蚀沟不同发育阶段侵蚀产沙速率预报模型等,同时加强对相关领域新技术新成果的转化,使其服务于黑土区水力侵蚀预测预报。

(4)黑土区水力侵蚀综合防治体系研究。包括对已有防治体系效益评价,新防治技术、体系的开发与建立,以及适用于黑土区不同土地利用类型的综合治理措施的研究。

#### 参考文献:

- [1] 阎百兴, 杨育红, 刘兴土, 等. 东北黑土区土壤侵蚀现状与演变趋势[J]. 中国水土保持, 2008(12):26-30.  
YAN Bai-xing, YANG Yu-hong, LIU Xing-tu, et al. The current situation and evolution trend of soil erosion in the black soil region of northeast China[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2008(12):26-30.
- [2] 水利部, 中国科学院, 中国工程院. 中国水土流失防治与生态安全: 东北黑土区卷[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Engineering. Soil erosion prevention and ecological security in China: The black soil region in northeast China[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [3] An J, Zheng F L, Wang B, et al. Using  $^{137}\text{Cs}$  technique to investigate the spatial distribution of erosion and deposition regimes for a small catchment in the black soil region, northeast China[J]. *Catena*, 2014, 23: 243-251.
- [4] Ouyang W, Wu Y, Hao Z, et al. Combined impacts of land use and soil property changes on soil erosion in a mollisol area under long-term agricultural development[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 613/614:798-809.
- [5] Jomaa S, Barry D A, Brovelli A, et al. Rain splash soil erosion estimation in the presence of rock fragments[J]. *Catena*, 2012, 92:38-48.
- [6] Rodrigo Comino J, Ruiz Sinoga J D, Senciales González J M, et al. High variability of soil erosion and hydrological processes in Mediterranean hillslope vineyards (Montes de Málaga, Spain)[J]. *Catena*, 2016, 145: 274-284.
- [7] 吴发启, 张洪江. 土壤侵蚀学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.  
WU Fa-qi, ZHANG Hong-jiang. Soil erosion science[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [8] 周一杨, 王恩姮, 陈祥伟. 模拟降雨条件下黑土溅蚀与团聚体分选特征[J]. 水土保持学报, 2008, 22(6):176-179.  
ZHOU Yi-yang, WANG En-heng, CHEN Xiang-wei. Splash erosion and selective typical black soil under characteristics of aggregate for artificial rainfall condition[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(6):176-179.
- [9] Cheng Q J, Cai Q G, Ma W J. Comparative study on rain splash erosion of representative soils in China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2008, 18(2):155-161.
- [10] 卜崇峰, 石长春, 蔡强国. 土壤结皮几种分析测算指标的应用评价[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2):240-243.  
BU Chong-feng, SHI Chang-chun, CAI Qiang-guo. Evaluation on calculation index for soil crust development[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(2):240-243.
- [11] 胡伟. 我国主要侵蚀土壤溅蚀和片蚀特征与机理研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.  
HU Wei. Characteristics and mechanisms of splash erosion and sheet erosion on hillslope of main typical eroded soils in China[D]. Beijing: University of China Academy of Sciences, 2016.
- [12] 范昊明, 蔡强国, 崔明. 东北黑土漫岗区土壤侵蚀垂直分带性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6):8-11.  
FAN Hao-ming, CAI Qiang-guo, CUI Ming, et al. Soil erosion developed with the vertical belts in the gentle hilly black soil regions in northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(6):8-11.
- [13] Cui M, Cai Q G, Zhu A X, et al. Soil erosion along a long slope in the gentle hilly areas of black soil region in northeast China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, 17(3):375-383.
- [14] Bu C F, Wu S F, Yang K B. Effects of physical soil crusts on infiltration and splash erosion in three typical Chinese soils[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2014, 29(4):491-500.
- [15] 范昊明, 顾广贺, 王岩松, 等. 东北黑土区侵蚀沟发育与环境特征[J]. 中国水土保持, 2013(10):75-78.  
FAN Hao-ming, GU Guang-he, WANG Yan-song, et al. Characteristics of eroded gully development and environment of black soil region in northeast China[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2013(10):75-78.
- [16] 樊华. 黑龙江省侵蚀沟特征及其影响因素研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.  
FAN Hua. Gully characteristics and its affecting factors in Heilongjiang Province, China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.
- [17] 尹哲睿. 黑龙江省拜泉县侵蚀沟分布的时空格局及影响因素研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.  
YIN Zhe-rui. Spatial temporal pattern and its influencing factors of erosion gully distribution in Baiquan County of Heilongjiang Province[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016.
- [18] 黄萌, 范昊明. 辽宁省侵蚀沟发育特性及地形分异特征[J]. 水土

- 保持学报, 2017, 31(5):93-98.
- HUANG Meng, FAN Hao-ming. Development characteristics and topographic differentiation features of erosion gully in Liaoning Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5):93-98.
- [19] 王岩松, 王念忠, 钟云飞, 等. 东北黑土区侵蚀沟省际分布特征[J]. 中国水土保持, 2013(10):67-69.
- WANG Yan-song, WANG Nian-zhong, ZHONG Yun-fei, et al. The distribution characteristics of gully in the black soil region of north-east China[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2013(10):67-69.
- [20] 唐莉, 孟令钦, 张锋. 黑土区坡耕地侵蚀沟发育机理[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(2):819-821.
- TANG Li, MENG Ling-qin, ZHANG Feng. Mechanism of gully development on slope farmland in black soil area, China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(2):819-821.
- [21] 许晓鸿, 隋媛媛, 张瑜, 等. 东北丘陵区沟蚀发展现状及影响因素分析[J]. 土壤学报, 2014(4):699-708.
- XU Xiao-hong, SUI Yuan-yuan, ZHANG Yu, et al. Development of gully erosion and its influences factors in hilly regions of northeast China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014(4):699-708.
- [22] An J, Zheng F L, Römken M M, et al. The role of soil surface water regimes and raindrop impact on hillslope soil erosion and nutrient losses[J]. *Natural Hazards*, 2013, 177(8):517-526.
- [23] 高峰, 詹敏, 战辉. 黑土区农地侵蚀性降雨标准研究[J]. 中国水土保持, 1989(11):19-21.
- GAO Feng, ZHAN Min, ZHAN Hui. Study on criteria of erosion rain in farmland of chernozem in Heilongjiang Province[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1989(11):19-21.
- [24] 张奎奎, 许靖华, 卢秀琴, 等. 黑龙江省土壤流失方程的研究[J]. 水土保持通报, 1992(4):1-9.
- ZHANG Xian-kui, XU Jing-hua, LU Xiu-qin, et al. Study on soil loss equation in Heilongjiang Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1992(4):1-9.
- [25] 郑粉莉, 边锋, 卢嘉, 等. 雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2):90-97.
- ZHENG Fen-li, BIAN Feng, LU Jia, et al. Effects of rainfall patterns on hillslope erosion with longitudinal ridge in typical black soil region of northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2):90-97.
- [26] 乔治, 徐新良. 东北林草交错区土壤侵蚀敏感性评价及因子识别[J]. 自然资源学报, 2012, 27(8):1349-1361.
- QIAO Zhi, XU Xin-liang. Assessment of soil erosion sensitivity and key factors identification in the wood-grass ecotone of northeast China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(8):1349-1361.
- [27] 许晓鸿, 崔斌, 张瑜, 等. 吉林省侵蚀沟分布与环境要素的关系[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3):93-96.
- XU Xiao-hong, CUI Bin, ZHANG Yu, et al. Relationship between distributions of erosion gully and environmental factors in Jilin Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(3):93-96.
- [28] Wang D, Fan H, Fan X. Distributions of recent gullies on hillslopes with different slopes and aspects in the black soil region of northeast China[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2017, 189(10):508.
- [29] 顾广贺, 王岩松, 钟云飞, 等. 东北漫川漫岗区侵蚀沟发育特征研究[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2):47-51.
- GU Guang-he, WANG Yan-song, ZHONG Yun-fei, et al. Development characteristics of gullies in rolling hilly regions in northeast of China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(2):47-51.
- [30] Fang H. Impact of land use change and dam construction on soil erosion and sediment yield in the black soil region, northeastern China[J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28:1482-1492.
- [31] 杨小垂, 王玉玺, 解运杰. 黑土区土壤侵蚀与土地利用关系分析——以黑龙江省克山县为例[J]. 水土保持研究, 2009, 16(1):55-58.
- YANG Xiao-chui, WANG Yu-xi, XIE Yun-jie. Relationship between land use change and soil erosion in black soil: Taking the county of Keshan, Heilongjiang Province as an example[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(1):55-58.
- [32] 方海燕, 盛美玲, 孙莉英, 等.  $^{137}\text{Cs}$  和  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  示踪黑土区坡耕地土壤侵蚀对有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7):1856-1862.
- FANG Hai-yan, SHENG Mei-ling, SUN Li-ying, et al. Using  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  to trace the impact of soil erosion on soil organic carbon at a slope farmland in the black soil region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(7):1856-1862.
- [33] 张孝存, 郑粉莉, 安娟, 等. 典型黑土区坡耕地土壤侵蚀对土壤有机质和氮的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013(4):182-186.
- ZHANG Xiao-cun, ZHENG Fen-li, AN Juan, et al. Effects of soil erosion on soil organic matter and nitrogen in sloping farmland in typical black soil region[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013(4):182-186.
- [34] 魏守才. 水土流失对黑土坡耕地土壤有机碳的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- WEI Shou-cai. Effect of soil erosion on soil organic carbon on sloping field of black soil in northeast China[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [35] 张瑞, 苟晓敏, 赵玉珍, 等. 东北黑土区土壤侵蚀对土壤持水性的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1):62-65.
- ZHANG Rui, GOU Xiao-min, ZHAO Yu-zhen, et al. Influence of soil erosion on soil water capacity in the black soil area of northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(1):62-65.
- [36] Gao X F, Xie Y, Liu G, et al. Effects of soil erosion on soybean yield as estimated by simulating gradually eroded soil profiles[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 145:126-134.
- [37] Liu H H, Zhang T Y, Liu B Y, et al. Effects of gully erosion and gully filling on soil depth and crop production in the black soil region, northeast China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68(6):1723-1732.
- [38] 胡刚, 伍永秋, 刘宝元, 等. 东北漫川漫岗黑土区浅沟和切沟发生的地貌临界模型探讨[J]. 地理科学, 2006, 26(4):449-454.
- HU Gang, WU Yong-qiu, LIU Bao-yuan, et al. Geomorphic threshold model for ephemeral gully incision in rolling hills with black soil in

- northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(4): 449-454.
- [39] Kinnell P I A. A comparison of the abilities of the USLE-M, RUSLE2 and WEPP to model event erosion from bare fallow areas[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 596/597:32-42.
- [40] 刘远利. WEPP模型(坡面版)在东北黑土区的适用性评价[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2010.
- LIU Yuan-li. Assessment on WEPP model(hillslope version) applicability to the black soil region in northeast China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010.
- [41] 盛美玲, 方海燕, 郭敏. 东北黑土区小流域侵蚀产沙 WaTEM/SEDEM模型模拟[J]. 资源科学, 2015, 37(4):815-822.
- SHENG Mei-ling, FANG Hai-yan, GUO Min. Modeling soil erosion and sediment yield using WaTEM/SEDEM model for the black soil region of northeast China[J]. *Resources Science*, 2015, 37(4):815-822.
- [42] Wang R H, Zhang S W, Yang J C, et al. Integrated use of GCM, RS, and GIS for the assessment of hillslope and gully erosion in the Mushi River sub-catchment, northeast China[J]. *Sustainability*, 2016, 8(4): 317.
- [43] 邢宇, 姜琦刚, 王耿明, 等. 基于RS和GIS的松辽平原黑土流失研究[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(2):189-194.
- XING Yu, JIANG Qi-gang, WANG Geng-ming, et al. Study on black soil loss in Songliao Plain based on RS and GIS[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2010, 32(2):189-194.
- [44] 王文娟, 邓荣鑫, 张树文. 东北典型黑土区沟蚀发生风险评价研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(12):2058-2067.
- WANG Wen-juan, DENG Rong-xin, ZHANG Shu-wen. Preliminary research on risk evaluation of gully erosion in typical black soil area of northeast China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(12):2058-2067.
- [45] 李国强. 东北黑土区水土流失综合治理模式研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2009.
- LI Guo-qiang. Studies on water and soil loss integrated control models in black soil region of northeast China[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009.
- [46] 苏子龙, 崔明, 范昊明. 东北漫岗黑土区防护林带分布对浅沟侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3):20-23.
- SU Zi-long, CUI Ming, FAN Hao-ming. Effect of shelterbelts distribution on ephemeral gully erosion in the rolling-hilly black soil region of northeast China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(3):20-23.
- [47] 孙莉英, 蔡强国, 陈生永, 等. 东北典型黑土区小流域水土流失综合防治体系[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3):36-41.
- SUN Li-ying, CAI Qiang-guo, CHEN Sheng-yong, et al. Integrated governing system on soil and water loss of small watersheds in a typical black soil region of northeast China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(3):36-41.
- [48] 陈光, 范海峰, 陈浩生, 等. 东北黑土区水土保持措施减沙效益监测[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(6):13-17.
- CHEN Guang, FAN Hai-feng, CHEN Hao-sheng, et al. Benefits of sediment reduction of soil conservation practices in the black region of northeast China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, 4(6):13-17.
- [49] 许晓鸿, 隋媛媛, 张瑜, 等. 黑土区不同耕作措施的水土保持效益[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(3):12-16.
- XU Xiao-hong, SUI Yuan-yuan, ZHANG Yu, et al. Effects of different tillages on the soil and water conservation benefits in northeast black soil area of China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(3):12-16.