

# 基于土地利用与植被恢复情景的土壤侵蚀演变特征

汪言在<sup>1</sup>,董一帆<sup>2,3</sup>,苏正安<sup>2</sup>

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院,重庆 401331;2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,成都 610041;3. 云南大学国际河流与生态安全研究院,昆明 650091)

**摘要:** 基于土地利用与植被恢复情景,使用USLE和土壤风蚀方程对坝上地区水蚀和风蚀强度进行估算。结果表明:(1)2015年坝上地区风蚀、水蚀和总侵蚀强度均值分别为 $8.83\pm 5.15\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $4.37\pm 6.62\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $13.22\pm 8.18\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ ;风蚀占总侵蚀67%,水蚀占33%。(2)土地利用调整情景下,风蚀、水蚀和总侵蚀强度分别减少4.9%~9.9%、2.9%~8.3%和4.3%~9.3%;土地利用+植被恢复情景下,风蚀、水蚀和总侵蚀强度则分别减少6.3%~13.8%、5.2%~16.2%和5.9%~14.3%。(3)土地调整面积与风蚀强度减少率呈对数关系,与水蚀强度减少率呈指数关系,与总侵蚀强度减少率呈线性关系( $P<0.01$ )。本文结果可以为土壤侵蚀方程计算及区域土壤侵蚀防治提供数据参考。

**关键词:** 坝上地区;土壤侵蚀;土地利用;植被恢复

土壤侵蚀导致土地退化,严重影响区域生态环境和社会经济发展<sup>[1-5]</sup>。土地利用和植被覆盖是影响土壤侵蚀的重要因素<sup>[6-9]</sup>,二者的水土保持效益一直以来是土壤侵蚀研究的热点问题<sup>[10,11]</sup>。以往研究认为,土地利用结构变化可以影响土壤侵蚀强度<sup>[12,13]</sup>,如坡面尺度上,植被不同空间组合方式会影响坡面侵蚀产沙量<sup>[14]</sup>;流域尺度上,土地斑块破碎度与土壤侵蚀强度存在相关性<sup>[15,16]</sup>;区域尺度上,情景模拟结果发现,每平方公里草地转换为耕地,可导致我国半干旱地区平均侵蚀强度增加 $0.38\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ <sup>[6]</sup>。鉴于土地利用空间格局对土壤侵蚀存在显著影响,以往研究使用土壤侵蚀方程估算土壤侵蚀强度时,多将土地利用作为重要参数分析区域土壤侵蚀强度演变<sup>[17]</sup>。

对于我国干旱半干旱地区,更多研究关注土地利用变化及其后续植被恢复的水土保持效益。如研究发现,我国农牧交错带地区草地和林地风蚀强度明显小于耕地<sup>[18,19]</sup>;黄土高原小流域在退耕还林还草工程实施后土壤水蚀强度多由剧烈转变为中度<sup>[20,21]</sup>,耕地贡献了主要土壤养分流失<sup>[5]</sup>。上述研究多基于实测或遥感数据,分析土地利用和植被恢复对土壤侵蚀的共同影响。但是土地利用调整不仅仅通过改变植被覆盖影响土壤侵蚀强度,也会通过改变坡度、坡长、经营方式以及地表土壤性质来间接影响土壤侵蚀强度<sup>[10,17]</sup>。因此,在使用土壤侵蚀方程分析土地利用结构优化对土壤侵蚀的影响,或估算未来土地利用结构变化情景下土壤侵蚀强度时,单纯使用土地利用优化数据而不改变植被盖度数据,到底会对土壤侵蚀计算结果产生哪些影响,有必要值得展开分析。本文选取张家口市坝上地区为研究区,使用USLE和土壤风蚀方程对坝上地区土壤水蚀和风蚀进行估算。基于

收稿日期: 2019-07-12; 修订日期: 2019-12-18

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07101001)

作者简介: 汪言在(1983-),男,山东济宁人,博士,副教授,主要从事区域地理与土壤侵蚀研究。

E-mail: wyz2003qu@163.com

土地利用调整情景和土地利用+植被恢复情景,分别估算坝上地区土壤侵蚀强度演变,进而厘定土地利用调整与植被恢复在土壤侵蚀强度变化中的各自贡献。以期通过本文研究,为土壤侵蚀估算和区域土壤侵蚀防治提供数据参考。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

本文选取张家口坝上地区为研究区,包括康保县,张北县、沽源县和尚义县。研究区位于张家口北部,占张家口总面积的1/3左右。该地区属内蒙古高原南缘,海拔多在1400 m以上,地势南高北低,相对高差较小,属典型高原景观(图1)。气候上,该地区属东亚大陆性季风气候,年降水量在330~400 mm,春季干燥多风沙,夏季降水集中,因此该地区风蚀与水蚀敏感性均较强。该地区同时属于典型农牧交错带,耕地与草地是该地区主要土地利用类型<sup>[22]</sup>,分别占土地总面积的63%和19%,2015年植被盖度均值为28.6%。人类活动易于加剧该地区土壤侵蚀的风险性<sup>[23]</sup>。

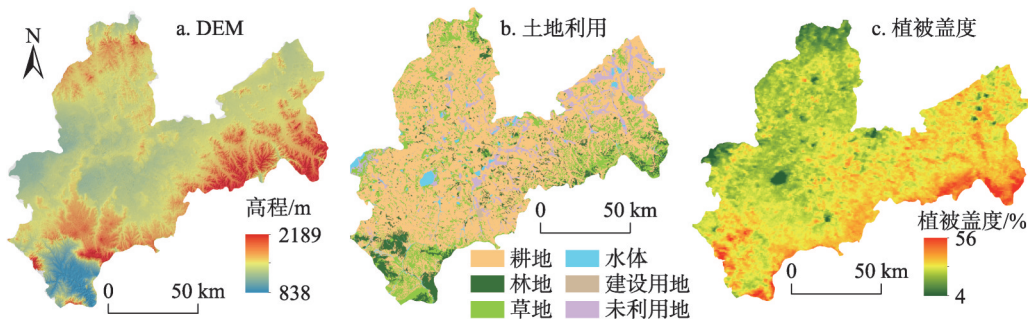


图1 研究区概况

Fig. 1 The study area

### 1.2 土壤侵蚀方程

本文使用通用土壤流失方程(USLE)对坝上地区土壤水蚀强度进行估算,该方法已被广泛应用于区域土壤水蚀研究中<sup>[24,25]</sup>。通用土壤流失方程的基本形式如下:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

式中:  $A$  为单位时间单位面积上平均土壤流失量 ( $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ );  $R$  为降水侵蚀力因子 ( $MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$ );  $K$  为土壤可蚀性因子 ( $t \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$ );  $LS$  为地形因子;  $C$  为作物覆盖与管理因子;  $P$  为土壤保持措施因子。

本文  $R$  因子和  $K$  因子计算方法同参考文献<sup>[25]</sup>,  $LS$  因子计算方法同参考文献<sup>[26]</sup>,  $R$  因子、 $K$  因子和  $LS$  因子的具体计算方法详见相关文献。

$C$  因子计算方法如下:

$$\text{草地覆盖因子}^{[27]}: C = e^{-0.0418(v-5)} \quad (2)$$

$$\text{林地覆盖因子}^{[28]}: C = 0.988 e^{-0.11v} \quad (3)$$

$$\text{农地覆盖因子}^{[28]}: C = 1.029 e^{-0.0235v} \quad (4)$$

式中:  $v$  为植被盖度 (%)。

$P$ 因子计算方法如下：

$$\text{坡度 } \theta \leq 27\% \text{ 区域}^{[29]}: P = 0.2 + 0.03\theta \quad (5)$$

$$\text{坡度 } \theta > 27\% \text{ 区域}^{[28]}: P = 0.0039 \times y_{20}^{0.6772} \quad (6)$$

式中： $\theta$ 为坡度（%）； $y_{20}$ 为日降雨>20 mm的年降雨量（mm）。

本文使用的风蚀模型来自参考文献<sup>[25]</sup>。该模型基于室内风洞实验和室外实测风蚀数据构建，主要应用于我国半干旱地区风蚀研究。对于耕地土壤风蚀模数，采用如下计算公式：

$$Q_1 = 10\hat{C} \sum_{j=1} < T_j \times \exp \left\{ a_1 + \frac{b_1}{z_0} + c_1 [(A \times u_j)^{1/2}] \right\} > \quad (7)$$

式中： $Q_1$ 为农田土壤风蚀模数（ $t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ）； $\hat{C}$ 为尺度修正系数； $T_j$ 为风蚀活动发生月份内风速为 $u_j$ 的累积时间（分钟）； $z_0$ 为空气动力学粗糙度； $A$ 为风速修订系数； $a_1$ 、 $b_1$ 和 $c_1$ 为模型参数。

对于林草地土壤风蚀模数，采用以下计算公式：

$$Q_2 = 10\hat{C} \sum_{j=1} < T_j \times \exp \left\{ a_2 + b_2 \times v^2 + c_2 / (A \times u_j) \right\} > \quad (8)$$

式中： $Q_2$ 为林草地土壤风蚀模数（ $t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ）； $a_2$ 、 $b_2$ 和 $c_2$ 为模型参数。风蚀模型系数及计算流程详见参考文献<sup>[25]</sup>。

使用上述土壤水蚀和风蚀方程，本文首先估算2015年张家口坝上地区土壤侵蚀强度，并以2015年土壤侵蚀强度为基础，进一步估算土地利用调整情景和土地利用+植被恢复情景下的土壤侵蚀强度。

### 1.3 数据来源

使用的土壤侵蚀估算数据主要包括2015年植被覆盖数据、气象数据、地形数据和土地利用数据等。其中，植被覆盖数据（NDVI）和地形数据来自地理空间数据云网站（www.gscloud.cn）；气象数据来自国家气象数据网（www.cma.gov.cn）；土地利用数据来自中科院遥感与数字地球研究所。

### 1.4 土壤侵蚀情景设置

#### (1) 土地利用调整情景

根据《张家口市承办2022年冬奥会城乡绿化方案》制定的绿化工程布局，本文设置五种土地转换模式，主要将张家口坝上地区生态脆弱区的耕地或未利用地转换为林草地。五种土地转换模式的土地转换面积逐渐增加（图2）。具体设置情景如下：

模式一：将未利用地调整为林草地；

模式二：在模式一基础上，将坝上边缘地区耕地调整为林草地；

模式三：在模式二基础上，将海拔>1800 m土石山区耕地调整为林草地；

模式四：在模式三基础上，将海拔1400~1800 m土石山区耕地调整为林草地；

模式五：在模式四基础上，将>25°耕地调整为林草地。

在土地利用调整情景下，仍使用2015年植被盖度数据计算张家口坝上地区土壤风蚀和水蚀强度，因此仅探讨了土地利用空间结构变化对土壤侵蚀强度的影响。

#### (2) 土地利用+植被恢复情景

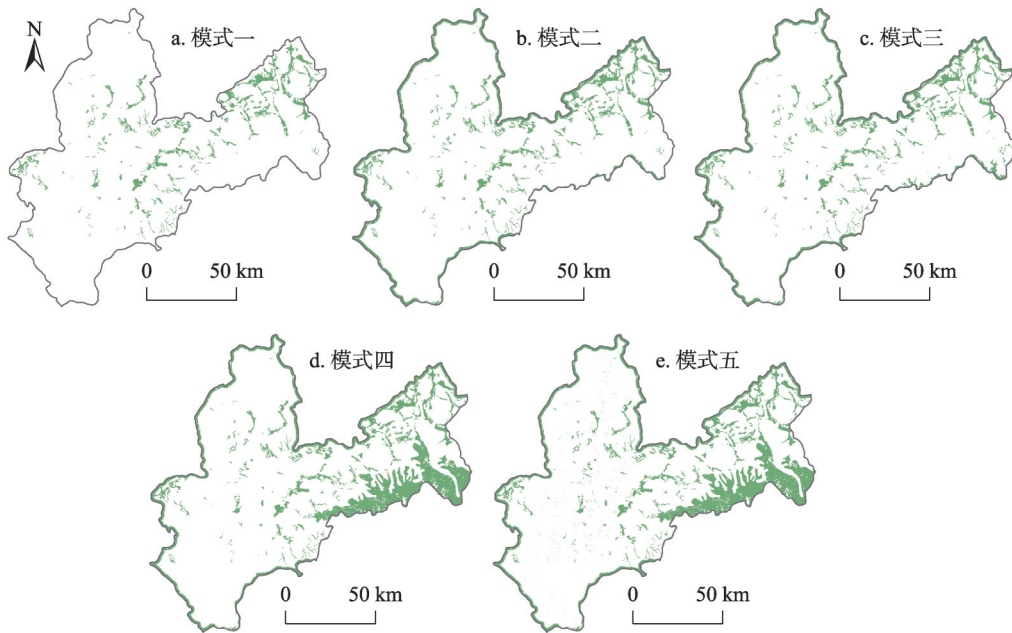


图2 土地利用调整区域

Fig. 2 The land use area of different adjustment scenarios

在上文土地利用情景基础上,将调整土地上面的植被盖度统一设定为研究区林草地盖度均值。然后计算土地利用+植被恢复情景下土壤水蚀和风蚀强度,以分析土地利用+植被盖度作为统一变量对土壤侵蚀强度的影响。

### (3) 土壤侵蚀强度变化率

以2015年土壤侵蚀强度数据为基础数据,以土地利用调整情景和土地利用+植被恢复情景的土壤侵蚀强度值为情景值,分析两类调整情景下的区域土壤侵蚀强度变化,土壤侵蚀减小率(水土保持效益)设定如下:

$$\text{土壤侵蚀减小率} = (\text{基础值} - \text{情景值}) / \text{基础值} \times 100 \quad (9)$$

## 2 结果分析

### 2.1 2015年土壤侵蚀强度

2015年张家口坝上地区土壤风蚀强度为 $8.83 \pm 5.15 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,水蚀强度为 $4.37 \pm 6.62 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,区域总侵蚀强度则为 $13.22 \pm 8.18 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ (图3)。坝上地区风蚀与水蚀比例分别为67%和33%,表明风蚀是坝上地区土壤侵蚀的主要形式和侵蚀过程。空间分布上,风蚀强度由西向东逐渐降低,尚义、康保、张北和沽源总侵蚀强度分别为 $9.43 \pm 6.16 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $11.83 \pm 4.47 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $8.98 \pm 7.37 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $5.58 \pm 3.18 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ;水蚀则由南向北逐渐降低,尚义、康保、张北和沽源总侵蚀强度分别为 $5.74 \pm 8.31 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $3.11 \pm 4.38 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $5.01 \pm 6.71 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $4.78 \pm 6.71 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ;总侵蚀受风蚀空间分布影响,同样呈现由西向东减小变化趋势,尚义、康保、张北和沽源总侵蚀强度分别为 $15.22 \pm 9.84 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $14.94 \pm 6.37 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $14.00 \pm 8.31 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $10.37 \pm 7.37 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

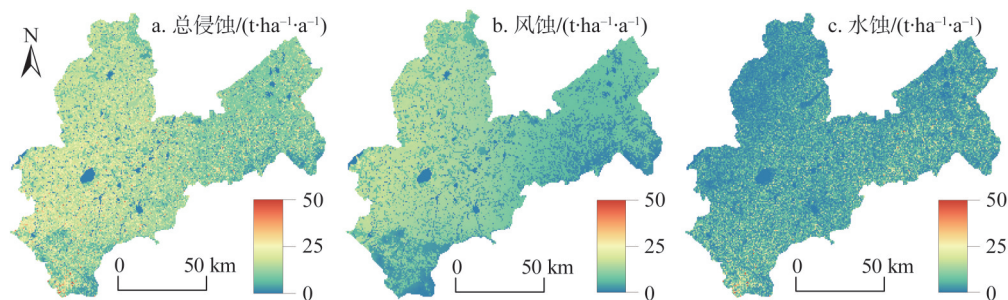


图3 张家口坝上地区2015年土壤侵蚀强度

Fig. 3 The soil erosion intensity of Bashang Area, Zhangjiakou in 2015

## 2.2 不同情景土壤侵蚀强度

### 2.2.1 土地利用调整情景

随土地利用调整面积的逐步增加，土壤水蚀、风蚀和总侵蚀强度也逐渐减小（图4）。具体来说，坝上地区土壤风蚀由 $8.40 \pm 5.29 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ （模式一）减小至 $7.96 \pm 5.41 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ （模式五）；土壤水蚀则由 $4.24 \pm 6.52 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ （模式一）减小至 $4.00 \pm 6.18 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ （模式五）；相应的土壤总侵蚀则由 $12.65 \pm 8.29 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 减小至 $11.99 \pm 8.29 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

进一步与2015年土壤侵蚀强度比较，仅对土地利用调整情景下，土壤风蚀强度减小率介于4.90%~9.90%，水蚀减小率介于2.91%~8.34%，总侵蚀减小率介于4.27~9.25%。上述结果说明，通过调整土地利用空间分布格局，能够有效减弱区域土壤侵蚀强度。但是相比2015年土壤侵蚀空间格局，坝上地区土壤侵蚀总体格局在土地利用调整情景下没有发生较大变化，说明局部土地利用调整虽然能够减弱区域侵蚀平均强度，但对于土壤侵蚀空间分布总体空间格局影响不明显。

### 2.2.2 土地利用+植被恢复情景

与仅调整土地利用情景的结果类似，随着土地调整面积的增加，在土地利用+植被恢复共同影响下，区域土壤风蚀、水蚀和总侵蚀的强度也逐渐减小。

具体来说（图5），坝上地区土壤风蚀由 $8.28 \pm 5.40 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ （模式一）减小至 $7.61 \pm 5.70 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ （模式五）；土壤水蚀则由 $4.14 \pm 6.51 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ （模式一）减小至 $3.66 \pm 6.05 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ （模式五）；相应的土壤总侵蚀则由 $12.43 \pm 8.47 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 减小至 $11.33 \pm 8.73 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。进一步与2015年土壤侵蚀强度比较，在土地利用+植被恢复的共同调整情景下，土壤风蚀强度减小率介于6.25%~13.83%，水蚀减小率介于5.18%~16.17%，总侵蚀减小率介于5.92%~14.25%。同样与仅对土地利用调整的情景相似，坝上地区土壤风蚀、水蚀和总侵蚀强度空间分布格局也没有表现出明显变化，说明在局部区域的土地利用调整和植被恢复，对土壤侵蚀强度的空间总体分布影响不明显。

## 3 结论与讨论

### 3.1 结论

本文以张家口坝上地区为研究区，基于土地利用情景和土地利用+植被恢复情景，使用USLE和土壤风蚀模型对坝上地区土壤水蚀和风蚀侵蚀强度进行了估算。结果表明：

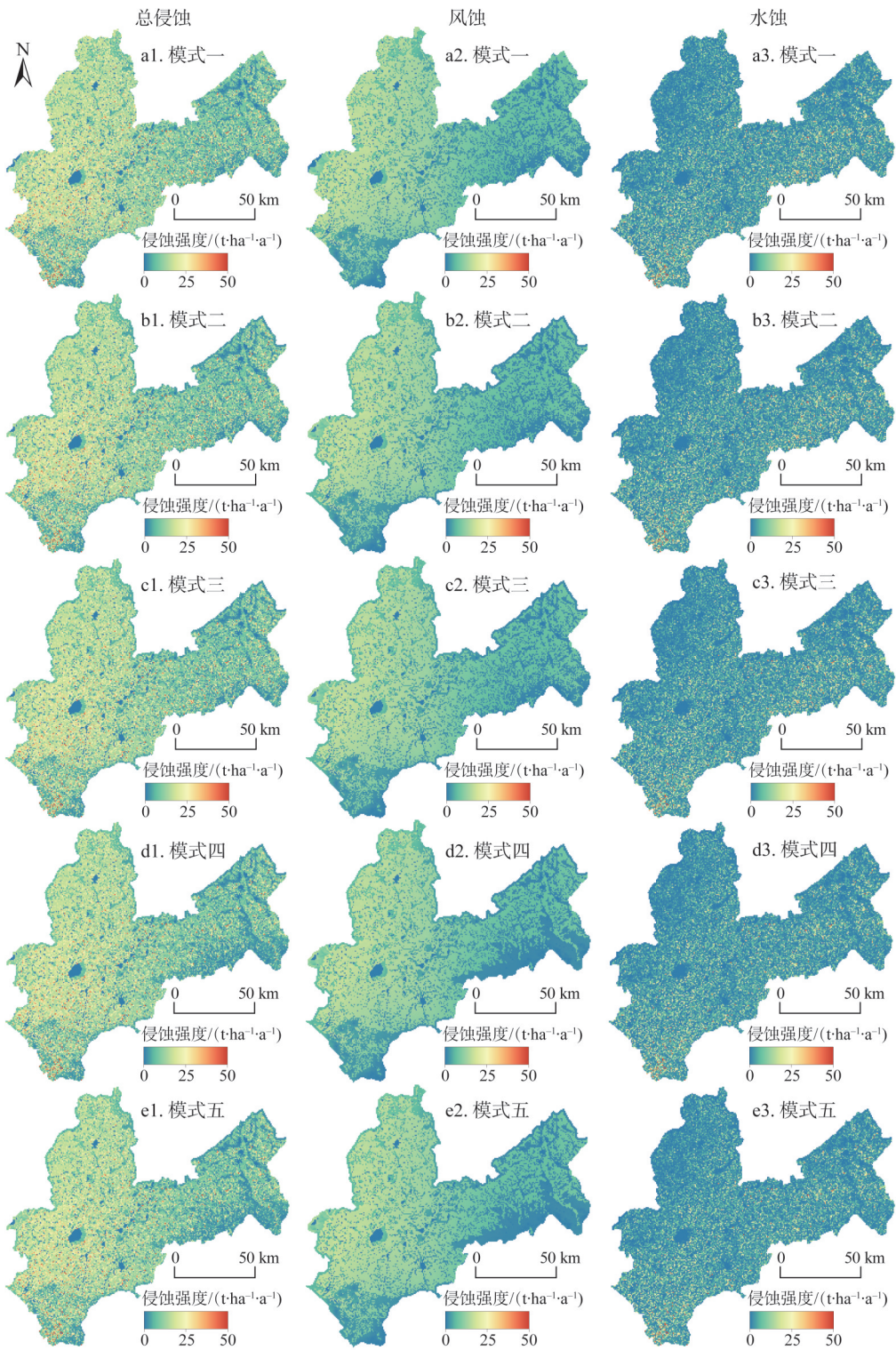


图4 土地利用情景下的土壤侵蚀强度

Fig. 4 The soil erosion intensity under different land use adjustment scenarios (without reforestation)

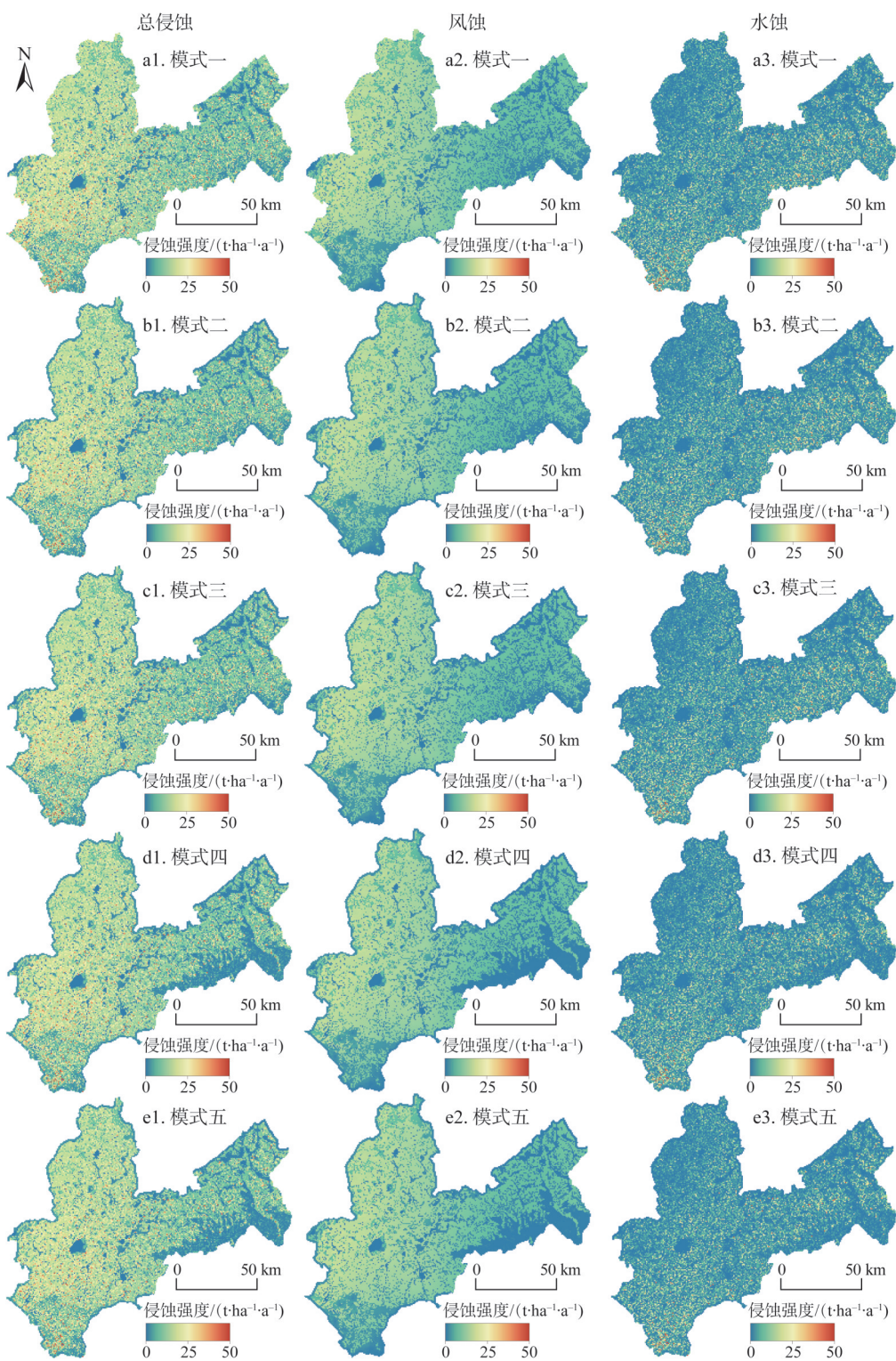


图5 土地利用+植被恢复情景下的土壤侵蚀强度

Fig. 5 The soil erosion intensity under different land use and reforestation adjustment scenarios

(1) 坝上地区2015年土壤风蚀、水蚀和总侵蚀的侵蚀强度均值分别为 $8.83 \pm 5.15 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $4.37 \pm 6.62 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $13.22 \pm 8.18 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。风蚀占坝上地区总侵蚀的67%，水蚀占总侵蚀的33%。(2) 若将该地区生态脆弱区内的未利用土地和部分耕地调整为林草地，在不改变植被盖度情况下，坝上地区风蚀、水蚀和总侵蚀的侵蚀强度可分别减少4.9%~9.9%、2.9%~8.3%和4.3%~9.3%；而将调整土地上的植被盖度修订到研究区平均植被盖度水平时，坝上地区风蚀、水蚀和总侵蚀的侵蚀强度则可分别减少6.3%~13.8%、5.2%~16.2%和5.9%~14.3%。(3) 坝上地区土地利用调整面积与土壤风蚀强度减少率呈对数关系，与水蚀强度减少率呈指数关系，与总侵蚀强度减少率呈线性关系 ( $P < 0.01$ )。本文结果表明，虽然土地利用调整可有效减小坝上地区土壤侵蚀强度，但在土地利用调整基础上，加强区域内植被恢复建设，可有效降低坝上地区土壤侵蚀强度、特别是土壤水蚀强度。本文结果可以为土壤侵蚀估算和区域土壤侵蚀防治提供参考。另外，在本文研究中，土地利用调整情景设置较为简单，土地利用和植被恢复复杂情景的土壤侵蚀演变有待进一步研究。

## 3.2 讨论

### 3.2.1 植被恢复对土壤侵蚀变化的贡献

基于土地利用调整情景，本文使用土壤侵蚀方程估算了坝上地区土壤风蚀和水蚀强度。结果显示，相比2015年侵蚀强度，坝上地区在调整土地利用结构后，土壤侵蚀强度分别减小4.90%~9.90%（风蚀），2.91%~8.34%（水蚀）和4.27%~9.25%（总侵蚀）。上述结果说明，在不改变植被盖度数据情况下，土地利用结构调整能够有效减轻土壤侵蚀强度。樊登星等<sup>[30]</sup>研究发现，土壤水蚀强度表现为裸地>耕地>人工草地>封禁荒草地；李玄姝等<sup>[31]</sup>研究发现，退耕地风蚀输沙量 ( $0.0417 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 远小于翻耕地输沙量 ( $0.2816 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ )，反映了土壤硬度对土壤风蚀存在显著影响。因此本文结果反映出在不改变植被盖度情况下，土地利用调整引起的土壤生态效应如土壤质地变化、土壤结皮等，以及由土地利用方式变化引起的坡度、坡长等侵蚀因素改变，也都可能会引起土壤侵蚀强度减小。

但是在长时间尺度上，土地利用调整往往伴随植被覆盖变化<sup>[32,33]</sup>。本文在土地利用调整基础上，将土地利用调整区域的植被盖度修订到研究区植被盖度平均水平，分析土地利用+植被恢复对土壤侵蚀的共同影响。结果表明，土壤侵蚀强度分别减小6.25%~13.83%（风蚀），5.18%~16.17%（水蚀）和5.92%~14.25%（总侵蚀）。土地利用+植被调整情景下，土壤侵蚀强度减小率明显大于仅调整土地利用的减小率。为进一步获取植被盖度调整对土壤侵蚀的影响，用土地利用+植被恢复情景的土壤侵蚀减小率减去土地利用情景的土壤侵蚀减小率。结果表明，在仅考虑植被恢复时，坝上地区土壤风蚀减小率介于1.35%~3.93%，水蚀减小率介于2.27%~7.83%，总侵蚀减小率介于1.65%~5.00%。与仅调整土地利用相比，上述数值偏小，说明当植被盖度调整到区域植被盖度均值水平时，其对土壤侵蚀减小率的贡献总体略小于土地利用的贡献。

### 3.2.2 土壤侵蚀强度与土地调整面积的关系

以往研究发现，不同土地利用方式的斑块面积对土壤侵蚀影响不同，耕地斑块面积与泥沙产沙量呈正相关，林草地斑块面积与泥沙产沙量呈负相关<sup>[15]</sup>。也有研究发现，经过长期植被恢复，土壤侵蚀强度与调整的土地面积呈负相关<sup>[34]</sup>。分析土地调整面积与土壤侵蚀减小率关系，能够揭示土地利用调整和植被恢复的水土保持效率。



本文结果显示(图6),对于土地利用调整情景,随土地调整面积增加,相应的土壤侵蚀减小率也逐渐增加。具体来看,土地调整面积与风蚀强度减少率呈对数关系;与水蚀强度减少率呈指数关系;与总侵蚀强度减少率呈线性关系( $P<0.01$ )。上述关系式说明,随着土地调整面积增加,风蚀减小率数值逐渐趋向稳定值,而水蚀减小率则会随着调整土地面积增加而继续增加,反映出在土地调整面积较小时,风蚀减小率对于总侵蚀减小率的贡献较大,但在土地调整面积较大时,水蚀减小率对总侵蚀减小率的贡献明显增强。张家口坝上地区土壤侵蚀类型以风蚀为主,尽管土地利用调整(耕地→林草地)可以增加下垫面粗糙度,但在侵蚀动力稳定情况下,当土地面积调整到一定数量后,风蚀强度基本趋于稳定。与风蚀不同,水蚀更依赖地形和降雨因素,坝上地区地形相对平坦,降水偏少,林草地面积增加可有效降低水蚀强度。另外,总侵蚀强度结果显示,每调整一平方公里土地,当仅调整土地利用时,总侵蚀强度降低0.03%;当仅调整植被盖度时,总侵蚀强度降低0.02%,说明土地利用调整与植被盖度调整的水土保持效率差异不大。

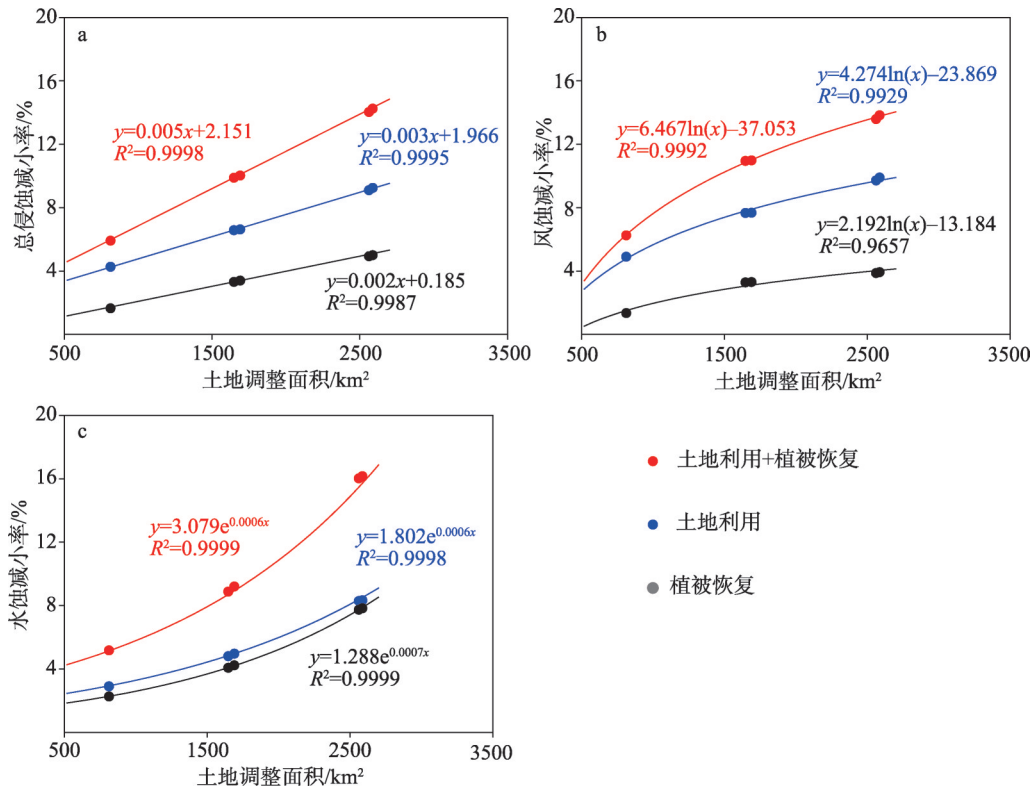


图6 土壤侵蚀强度减小率与土地调整面积关系

Fig. 6 The relationship between reduced soil erosion and adjusted land area

参考文献(References):

[1] 张文强, 孙从建, 李新功. 晋西南黄土高原区植被盖度变化及其生态效应评估. 自然资源学报, 2019, 34(8): 1748-1758. [ZHANG W Q, SUN C J, LI X G. Vegetation cover change and ecological effect assessment in the Loess Plateau of Southwest Shanxi province based on remote sensing image. Journal of Natural Resources, 2019, 34(8): 1748-1758.]

[2] 肖玉, 谢高地, 甄霖, 等. 阴山北麓草原生态功能区防风固沙服务受益范围识别. 自然资源学报, 2018, 33(10): 1742-

1754. [XIAO Y, XIE G D, ZHEN L, et al. Identifying the benefit areas of wind erosion prevention in the key ecological function area of grassland at the northern foot of Yinshan Mountain. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(10): 1742-1754.]
- [3] SHI P J, YAN P, YUAN Y, et al. Wind erosion research in China: Past, present and future. *Progress in Physical Geography*, 2004, 28(3): 366-386.
- [4] ZHOU J, FU B J, GAO G Y, et al. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China. *Catena*, 2016, 137(1): 1-11.
- [5] CHEN Z J, WANG L, WEI A S, et al. Land-use change from arable lands to orchards reduced soil erosion and increased nutrient loss in a small catchment. *Science of the Total Environment*, 2019, 648(1): 1097-1104.
- [6] GAO Q, YU M, CI L J. Modeling wind and water erosion in northern China under climate and land use changes. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 57(1): 46-55.
- [7] 周平, 蒙古军. 鄂尔多斯市 1988—2000 年土壤水力侵蚀与土地利用时空变换关系. *自然资源学报*, 2009, 24(10): 1706-1718. [ZHOU P, MENG J J. The temporal and spatial variability relationship of soil water erosion and land use type in Ordos during the period of 1988-2000. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(10): 1706-1718.]
- [8] 曹梓豪, 赵清贺, 丁圣彦, 等. 坡度和植被盖度对河岸坡面侵蚀产沙特征的影响. *自然资源学报*, 2017, 32(11): 1892-1904. [CAO Z H, ZHAO Q H, DING S Y, et al. Effect of slope gradient and vegetation cover on sediment yielding characteristics of the riparian slope. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(11): 1892-1904.]
- [9] 孙从建, 侯慧新, 陈伟, 等. 典型黄土塬区不同植物措施水土保持效应分析. *自然资源学报*, 2019, 34(7): 1405-1416. [SUN C J, HOU H X, CHEN W, et al. Effects of different plant measures on soil and water conservation in typical tableland zones on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(7): 1405-1416.]
- [10] 柳长顺, 齐实, 史明昌. 土地利用变化与土壤侵蚀关系的研究进展. *水土保持学报*, 2001, 15(5): 10-14. [LIU C S, QI S, SHI M C. Process of study on relationship between land use change and soil erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(5): 10-14.]
- [11] 李婷, 刘康, 马力阳, 等. 秦岭山地丹江流域土地利用变化的土壤侵蚀效应评价. *自然资源学报*, 2016, 31(4): 583-596. [LI T, LIU K, MA L Y, et al. Evaluation on soil erosion effects driven by land use changes over Danjiang River Basin of Qinling Mountain. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(4): 583-596.]
- [12] 傅伯杰, 陈利顶, 王军, 等. 土地利用结构与生态过程. *第四纪研究*, 2003, 23(3): 247-254. [FU B J, CHEN L D, WANG J, et al. Land use structure and ecological processes. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(3): 247-254.]
- [13] 傅伯杰, 赵文武, 陈利顶, 等. 多尺度土壤侵蚀评价指数. *科学通报*, 2006, 51: 1936-1943. [FU B J, ZHAO W W, CHEN L D, et al. A multiscale soil loss evaluation index. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(4): 448-456.]
- [14] FENG T J, WEI W, CHEN L D, et al. Assessment of the impact of different vegetation patterns on soil erosion processes on semiarid loess slopes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(9): 1860-1870.
- [15] 廖凯涛, 胡建民, 宋月君, 等. 南方红壤丘陵区流域植被景观格局变化及水沙响应关系. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 36-43. [LIAO K T, HU J M, SONG Y J, et al. Effects of vegetation landscape patterns on runoff and sediment in red soil hilly region of Southern China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(3): 36-43.]
- [16] 张建香, 张勃, 张华, 等. 黄土高原的景观格局变化与水土流失研究: 以黄土高原马莲河流域为例. *自然资源学报*, 2011, 26(9): 1513-1526. [ZHANG J X, ZHANG B, ZHANG H, et al. Landscape pattern change and soil erosion research: Take Malian River Basin in Loess Plateau as an example. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(9): 1513-1526.]
- [17] 李天宏, 郑丽娜. 基于 RUSLE 模型的延河流域 2001—2010 年土壤侵蚀动态变化. *自然资源学报*, 2012, 27(7): 1164-1176. [LI T H, ZHENG L N. Soil erosion changes in the Yanhe watershed from 2001 to 2010 based on RUSLE model. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(7): 1164-1176.]
- [18] 孙艳荣, 刘鸿燕, 范涛, 等. 河北坝上地区不同土地利用类型的土壤风蚀研究. *北京大学学报: 自然科学版*, 2010, 46(4): 649-654. [SUN Y R, LIU H Y, FAN T, et al. Soil wind erosion under different land use types in Bashang of Hebei province. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, 46(4): 649-654.]
- [19] 杨钦, 郭中领, 王仁德, 等. 河北坝上不同土地利用方式对土壤风蚀的影响. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(2): 185-191. [YANG Q, GUO Z L, WANG R D, et al. Influence of different land uses on soil wind erosion in Bashang area, He-

- bei, China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(2): 185-191.]
- [20] 闫瑞, 张晓萍, 李够霞, 等. 基于RUSLE的北洛河上游流域侵蚀产沙模拟研究. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 32-38. [YAN R, ZHANG X P, LI G X, et al. Soil erosion and sediment yield assessment based on RUSLE in Beilou River on the Loess Plateau, China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(4): 32-38.]
- [21] 赵文启, 刘宇, 罗明良, 等. 黄土高原小流域植被恢复的土壤侵蚀效应评估. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 89-95. [ZHAO W Q, LIU Y, LUO M L, et al. Effect of revegetation on soil erosion in small watershed of the Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(5): 89-95.]
- [22] 刘超, 霍永伟, 许月卿, 等. 生态退耕前后张家口市耕地变化及影响因素识别. *自然资源学报*, 2018, 33(10): 1806-1820. [LIU C, HUO Y W, XU Y Q, et al. Changes in cultivated land and influencing factors before and after the implementation of Grain for Green Project in Zhangjiakou city. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(10): 1806-1820.]
- [23] 海春兴, 马礼, 王学萌, 等. 农牧交错带典型地段土地沙化主要因素分析: 以河北坝上张北县为例. *地理研究*, 2002, 21(5): 543-551. [HAI C X, MA L, WANG X M, et al. Main factors analysis about soil desertification in typical section of interlock area of farming and pasturing: The case of Zhangbei county, Bashang area of Hebei province. *Geographical Research*, 2002, 21(5): 543-551.]
- [24] YAN R, ZHANG X P, YAN S J, et al. Estimating soil erosion response to land use/cover change in a catchment of the Loess Plateau, China. *International Soil and Water Conservation Research*, 2018, 6(1): 13-22.
- [25] 高尚玉, 张春来, 邹学勇, 等. 京津风沙源治理工程效益(第二版). 北京: 科学出版社, 2012. [GAO S Y, ZHANG C L, ZOU X Y, et al. *Benefits of Beijing-Tianjin Sand Source Control Engineering*. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2012.]
- [26] 胡刚, 宋慧, 石星军, 等. 基于RUSLE的卧虎山水库流域土壤侵蚀特征分析. *地理科学*, 2018, 38(4): 610-617. [HU G, SONG H, SHI X J, et al. Soil erosion characteristics based on RUSLE in the Wohushan Reservoir Watershed. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(4): 610-617.]
- [27] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996, 2(1): 1-9. [JIANG Z S, WANG Z Q, LIU Z. Quantitative study on spatial variation of soil erosion in a small watershed in the loess hilly region. *Journal of Soil Erosion and Soil Conservation*, 1996, 2(1): 1-9.]
- [28] 刘宝元, 毕小刚, 符素华, 等. 北京土壤流失方程. 北京: 科学出版社, 2010. [LIU B Y, BI X G, FU S H, et al. *Beijing Soil Loss Equation*. Beijing: Science Press, 2010.]
- [29] FU B J, LIU Y, LU Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284-293.
- [30] 樊登星, 余新晓, 贾国栋, 等. 密云水库上游不同土地利用方式下的土壤侵蚀特征. *水土保持通报*, 2015, 35(1): 5-9. [FAN D X, YU X X, JIA G D, et al. Characteristics of soil erosion under different land use types in upper area of Miyun Reservoir. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(1): 5-9.]
- [31] 李玄姝, 常春平, 王仁德. 河北坝上土地利用方式对农田土壤风蚀的影响. *中国沙漠*, 2014, 34(1): 23-28. [LI X S, CHANG C P, WANG R D. Influence of land use ways on the farmland soil wind erosion in Bashang area, Hebei, China. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(1): 23-28.]
- [32] 白雪莲, 季树新, 王理想, 等. 鄂尔多斯十大孔兑取区植被生产力变化趋势对土地利用转移的响应. *自然资源学报*, 2019, 34(6): 1186-1195. [BAI X L, JI S X, WANG L X, et al. Response of change trend of vegetation productivity to land use conversion in Ten Tributaries Basin of Ordos. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(6): 1186-1195.]
- [33] 赵安周, 张安兵, 刘海新, 等. 退耕还林(草)工程实施前后黄土高原植被覆盖时空变化分析. *自然资源学报*, 2017, 32(3): 449-460. [ZHAO A Z, ZHANG A B, LIU H X, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage before and after implementation of Grain for Green Project in the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(3): 449-460.]
- [34] LIU Y, FU B J, LU YH, et al. Hydrological responses and soil erosion potential of abandoned cropland in the Loess Plateau, China. *Geomorphology*, 2012, 138(1): 404-414.

## Assessment of soil erosion change under land use and reforestation scenarios

WANG Yan-zai<sup>1</sup>, DONG Yi-fan<sup>2,3</sup>, SU Zheng-an<sup>2</sup>

(1. College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2. Key Laboratory of Mountain Hazards & Surface Process, Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China; 3. Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650091, China)

**Abstract:** Soil erosion can lead to deterioration of soil health because it degrades soil quality and disrupts both mechanical and chemical processes in the soil. In semiarid regions of northern China, soil erosion is dominated by water and wind erosion, and these two erosion types could occur contemporaneously. To understand appropriate mitigation strategies for soil erosion, we must determine the magnitude and relative influence of water and wind erosion, which varies greatly between regions. Both land use adjustment and reforestation are efficient measures to control soil loss. Many studies have explored the soil erosion reduction based on land use adjustment and reforestation. Bashang region, located in the typical semiarid, agropastoral ecotone of North China, was generally considered a region with severe wind and water erosion. In this study, under five scenarios of land use adjustment, assessment of water erosion and wind erosion in Bashang was conducted using USLE and wind erosion model. Our results show that, (1) regional wind erosion rates, water erosion rates and total erosion rates in Bashang are  $8.83 \pm 5.15 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $4.37 \pm 6.62 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$  and  $13.22 \pm 8.18 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ , respectively. Under five scenarios of land use adjustment, if reforestation practices are not included, (2) the reduction rates of wind erosion, water erosion and total erosion are 4.9%-9.9%, 2.9%-8.3% and 4.3%-9.3%, respectively. However, under the five scenarios, if reforestation practices are included, the reduction rates of wind erosion, water erosion and total erosion are 6.3%-13.8%, 5.2%-16.2% and 5.9%-14.3%, respectively. Thus, the soil erosion reduction rates just due to reforestation were 1.35%-3.93%, 2.27%-7.83% and 1.65%-5.00%, respectively for wind erosion, water erosion and total erosion. (3) We also found that, the reductions of wind erosion have logarithmic relation with the increase of forest land area, the reductions of water erosion have exponential relation with the increase of forest land area, correspondingly, and the reduction of total erosion have linear relation with the increase of forest land area ( $P < 0.01$ ). Our results indicate that, land use adjustment is an efficient measure for mitigating soil erosion, however, the reforestation practices after land use adjustment are important for reduction of soil loss, especially for reduction of water erosion in the study region.

**Keywords:** Bashang region; soil erosion; land use; reforestation practice