

基于 RWEQ 模型的青海省土壤风蚀模数估算

江 凌, 肖 燚, 欧阳志云, 徐卫华, 郑 华

(中国科学院 生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘 要: 土壤风蚀是许多国家和地区的主要环境问题之一, 定量分析是风蚀研究的热点和难点。本研究基于修正风蚀模型(RWEQ), 运用遥感和地理信息技术对青海省年均风蚀模数进行了估算。结果表明: 青海省风蚀发生总面积为 3 870 万 hm^2 , 占全省面积的 53.6%, 年均风蚀总量约 17.8 亿 t, 平均风蚀模数为 45.99 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。青海省风蚀等级在大部分地区以轻度风蚀为主, 整体风蚀危害不大, 但在中度以上风蚀等级较为集中的柴达木盆地则风蚀危害相对严重。模型估算结果与 ^{137}Cs 推算结果具有较高的拟合性($R^2=0.912$), 表明 RWEQ 模型在国内区域尺度运用上具有一定可行性。

关键词: 风蚀; GIS; RWEQ 模型

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)01-0021-05

Estimate of the Wind Erosion Modules in Qinghai Province Based on RWEQ Model

JIANG Ling, XIAO Yi, OUYANG Zhiyun, XU Weihua, ZHENG Hua

(State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology,

Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Wind erosion is one of the main environment problems in many countries and regions, and quantitative analysis is a hotspot of wind erosion research. With tools of remote and GIS, the RWEQ model was used to simulate the wind erosion modules in Qinghai Province of China. The result showed that the area of about 38.70 million hm^2 suffered from wind erosion, accounting for 53.6% of Qinghai land area of Qinghai, the amount of soil loss caused by wind erosion was 1.78 billion tons, and average wind erosion module was 45.99 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$. Light wind erosion is the main intensity in most parts of Qinghai, and harm caused by wind erosion in most regions is light, but serious in Qaidam Basin where more higher intensity mainly distributes than the moderate one. The comparison between RWEQ simulation and ^{137}Cs tracing showed high fit ($R^2 = 0.912$), indicating the application of RWEQ to regional scale in China was feasible.

Keywords: wind erosion; GIS; RWEQ model

土壤侵蚀是世界性的环境问题。水力和风力是产生土壤侵蚀的两大主要营运力。水力侵蚀在学界已进行了多年的研究并取得了丰硕的成果, 而作为土壤侵蚀另一主要形式的土壤风蚀研究却相对滞后。以风蚀机制为基础的风蚀定量化研究是近年来风蚀研究的热点内容, 国外在这方面的研究起步较早。

20 世纪 30 年代起国外学者就进行了一系列的基础研究^[1-8], 为风蚀模型的构建提供了坚实的理论基础。1965 年美国农业部科学家 Woodruff 和 Sid-doway 提出了风蚀方程 WEQ (Wind Erosion Equation)^[9-10]。在过去的 40 多年里, 美国农业部使用

WEQ 来评估农田管理措施对土壤风蚀的潜在影响, 并通过调整农田管理制度, 有效地降低了农田土壤风蚀。但作为一个纯经验模型, 其局限性也很明显。鉴于此, 在美国农业部的主导下对该模型进行了较大的修正, 将经验和过程结合起来, 并充分考虑了土壤可蚀性、土壤结皮、土壤水分、地表粗糙度、植被覆盖度、气候因子等与土壤风蚀相关的因子, 形成了修正风蚀模型——RWEQ^[11]。

在 WEQ 模型提出后的几十年中不断有新的风蚀模型问世, 诸如帕萨克模型^[12]、德克萨斯模型 TEAM^[13]、WEAM 模型^[14]、小流域风蚀统计模型^[15]、

收稿日期: 2014-03-31

修回日期: 2014-05-09

资助项目: 全国生态环境十年变化遥感调查与评估(STSN-04-01)

作者简介: 江凌(1976—), 男, 博士研究生, 主要从事生态评价与规划方面的研究。E-mail: jiangling21@sohu.com

通信作者: 肖燚(1972—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事生态评价与地理信息系统开发方面的研究。E-mail: xiaoyi@rcees.ac.cn

WEPS 模型^[16]、植被—风沙动力耦合模型^[17]等等。这些模型虽然各有所长,但修正后的 RWEQ 则具有因子相对全面、构成相对简单、数据易于获取、与 GIS 系统具有较强亲和力等优势而在国内外获得了一定程度的应用。如 Zobeck^[18]、Van Pelt^[19]、Feras Youssef^[20]等学者均对 RWEQ 模型的应用进行了尝试并取得了较好的结果。国内风蚀定量研究虽然起步较晚,成果不多,但已有学者利用 RWEQ 模型在国内进行了尝试。如张国平等^[21]基于 RWEQ 模型计算了全国风场强度指数,探讨了风能与风蚀的关系,朱耀东^[22]利用 RWEQ 模型计算了小块农田的土壤风蚀速率分析残茬对农田土壤侵蚀的影响,殷海军^[23]基于样地试验对 RWEQ 进行了修正。RWEQ 模型在国外获得了一定的应用,成功的计算了许多区域的具体风蚀模数,但国内研究尚处于起步阶段,大多围绕模型的部分结构进行试验性运用和修改,并未运用模型计算出某一区域的具体风蚀模数,从而对风蚀进行定量的评价。

本研究采用修正风蚀方程(RWEQ),运用 ArcGIS 建立青海省空间数据库,生成 RWEQ 的各因子图层,并借助 ArcGIS GRID 模块进行图像运算,计算出每个栅格的风蚀量,从而估算整个青海省土壤风力侵蚀量,并划分风力侵蚀强度,对其空间分异进行分析,以期青海省区域生态系统保护和防风固沙工作提供科学的依据和借鉴。

1 研究区概况

青海省位于祖国西北部的世界屋脊—青藏高原,位于北纬 31°39′—39°19′,东经 89°35′—103°04′,东西长 1 200 km,南北宽 800 km,总面积 7 217 万 hm^2 。青海省生态系统分布类型丰富,主要生态类型为占青海省 34.3% 的草地生态系统,总面积 2 804.7 万 hm^2 ,其次为占全省面积 32.9% 沙漠裸地,总面积为 2 378 万 hm^2 。全省生态质量从空间上由东南向西北不断劣化。

青海省地貌总体格局为北部山地,中部盆地、低谷和低地,南部高原。高大山脉、山间盆地、高原相间排列,呈现马鞍形地貌格局,地势高耸且高差悬殊,高差达 5 200 多米,并自西向东逐渐倾斜,全省平均海拔 3 500 m 以上。全省气温普遍较低,年均气温为 -5.6~8.9℃,地区差异显著,垂直变化明显^[24]。

青海省风力侵蚀属于全国三北戈壁沙漠及沙地风沙二级类型区的蒙新青高原盆地荒漠强度风蚀区。由于地处内陆腹地,加之全球气候的变化,使中西部地区降雨更为稀少,径流量减少,湿地退化。同时由

于过度超载放牧使草场严重退化,土地沙漠化剧烈发展。据调查研究,截至 2004 年青海省沙化土地从 1959 年的 597 万 hm^2 增加到 1 255.8 万 hm^2 ,40 多年来发展速度非常快,基本以每年 2.5 万 hm^2 的速度扩大,虽然在 1999—2004 年沙化面积首次出现了降低趋势,5 a 间沙化面积减少了 83.8 万 hm^2 ,但并没有改变青海全省属于沙化严重发展区的现状。风力侵蚀的面积以及强度在不断递增,生态环境日趋严重恶化(图 1)^[25-27]。

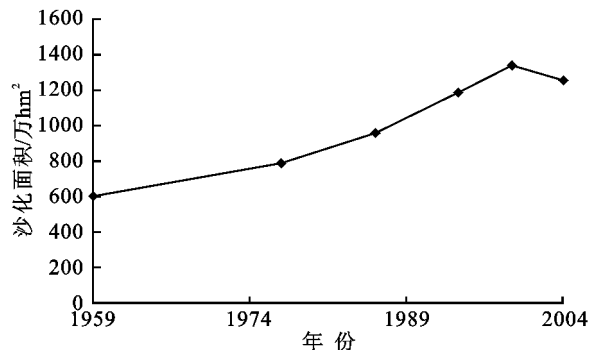


图 1 青海省沙化土地发展趋势

2 RWEQ 模型及数据来源

2.1 RWEQ 模型结构

RWEQ 模型所表述的风蚀是在气象、土壤可蚀性、抗蚀性(结皮)、植被覆盖、地表糙度等多因子综合作用下所造成的土壤转运,其最大转运容量定义为 Q_{\max} (公式 1),转移量达到最大转运容量 63.2% 的地块长度称为关键地块长度 S (公式 2),研究区内所有的土壤转运总量即为该区域的土壤损失量 S_L (公式 3)。

$$Q_{\max} = 109.8[\text{WF} \cdot \text{EF} \cdot \text{SCF} \cdot K' \cdot C] \quad (1)$$

$$S = 150.71(\text{WF} \cdot \text{EF} \cdot \text{SCF} \cdot K' \cdot C)^{-0.3711} \quad (2)$$

$$S_L = \frac{2z}{S^2} Q_{\max} e^{-(z/s)^2} \quad (3)$$

式中: Q_{\max} ——最大转运容量(kg/m); S ——关键地块长度(m); S_L ——土壤损失量(kg/m^2); z ——所计算的下风向距离,本次计算取 50 m; WF ——气象因子; EF ——土壤可蚀性因子; SCF ——土壤结皮因子; K' ——土壤糙度因子; C ——植被覆盖因子。在自然条件下,风蚀的发生与发展受风速、温度、降雨、太阳辐射、降雪等多种气象条件的推动或制约。气象因子 WF 即各类气象因子对风蚀综合影响的反映,其表达式见公式(4)。

$$\text{WF} = W_f \cdot \frac{\rho}{g} \cdot \text{SW} \cdot \text{SD} \quad (4)$$

式中: WF ——气象因子(kg/m); W_f ——风力因子(m/s)³; ρ ——空气密度(kg/m^3); g ——重力加速度(m/s^2); SW ——土壤湿度因子,无量纲; SD ——雪盖

因子,无量纲。

对于不同粒级的土壤颗粒来说,颗粒越粗所需的剪切风速越大,土壤可蚀性也越小。而土壤中有机质、黏土、碳酸钙等物质的存在会使土壤颗粒形成微团聚体可降低土壤可蚀性。通过多年试验分析,Fryear将 EF 值以如下方程(公式 5)加以计算。

$$EF = \frac{29.09 + 0.31sa + 0.17si + 0.33(sa/cl) - 2.59OM - 0.95CaCO_3}{3} \quad (5)$$

式中:sa——土壤粗砂含量(%);si——土壤粉砂含量(%);cl——土壤黏粒含量(%);OM——土壤有机质含量(%);CaCO₃——碳酸钙含量(%),本次计算取 0。

在风蚀过程中,Zobeck 的研究表明,结皮的存在可以减少可侵蚀颗粒的含量,降低土壤颗粒的磨蚀作用,有利于沙丘的固定,防止和减弱土壤风力侵蚀。通过对不同黏土和有机质含量土壤的风洞试验,Hagen 等^[16]建立了土壤结皮因子 SCF 的定量方程(公式 6)。

$$SCF = 1 / (1 + 0.0066cl^2 + 0.021OM^2) \quad (6)$$

式中:cl——土壤黏粒含量(%);OM——土壤有机质含量(%).

植被的存在与多寡对土壤风蚀具有极为重要的影响,不仅可以增加地表糙度增大起沙风速,还可对移动颗粒起到一定阻碍作用^[28]。植被覆盖因子 C 值的计算见公式(7)。

$$C = e^{-0.0438SC} \quad (7)$$

式中:SC——植被覆盖度(%).

在 RWEQ 中,地表糙度主要是指农田由于耕作产生块状土以及土垄的存在而使地表条件发生改变并对土壤风蚀产生一定影响。地表糙度分为随机糙度 Crr 和土垄糙度 Kr,地表糙度因子 K' 的计算见公式(8)。

$$K' = e^{(1.86K_r - 2.41K_r^{0.934} - 0.127Crr)} \quad (8)$$

在区域尺度的计算中,要考虑耕作产生的随机糙度 Crr 相对困难,因此在本次计算中由土垄造成的地表糙度 Kr 以地形起伏产生的粗糙度计算公式予以替代,地形起伏糙度因子以 smith-carson 方程^[29]计算(公式 9)。

$$K_r = 0.2 \times \frac{\Delta(H)^2}{L} \quad (9)$$

式中:K_r——地形糙度(cm);Crr——随机糙度因子(cm),本次取 0;K'——地形糙度因子(cm);L——地势起伏参数;ΔH——距离 L 范围内的海拔高程差,在 GIS 软件中使用 Neighborhood statistics 工具计算 DEM 数据相邻单元格地形起伏差值。

2.2 数据收集及处理

根据 RWEQ 模型的 5 个因子收集了模型所需数据:1:100 万土壤属性数据集(包括土种类型、土壤粗砂、细砂、黏粒、有机质等理化性质)^[30];青海省降雨、气温、风速、太阳辐射、降雪等月均数据;生态系统类型图和植被覆盖度数据;数字高程 DEM 数据。这些数据类型多样、格式各异,在 ArcGIS 软件中统一投影方式(Albers 椭球体)和精度(90 m)后,共同构成青海省风蚀评价数据库。

3 结果分析及验证

3.1 模型因子计算结果

(1) 气象因子 WF 计算结果。青海省气象因子 WF 值域为 0.03~36.99 kg/m,体现了综合气象条件下风力对土壤颗粒的搬运能力大小。由附图 1 可见,WF 值较高的区域主要集中在柴达木盆地、共和盆地以及可可西里局部地区。其中柴达木盆地和共和盆地 WF 因子偏高的原因主要是区域温度、高蒸发量大而降雨稀少,使土壤含水极低,极易受到风蚀影响;而可可西里地区平均风速较大,日平均风速常达 10 m/s 以上,在冬春两季甚至会出现 20 m/s 以上的瞬时极值风速,大风频发,日均风速在 5 m/s 以上的天数可达 50~70 d/a。

(2) 土壤可蚀性因子 EF 计算结果。青海省主要分布的土壤种类有草毡土、黑毡土、寒钙土、冷钙土、风沙土、寒漠土、寒冻土、石质土和粗骨土,其中分布最广的是草毡土、寒钙土和黑毡土 3 类,这 3 种土类分布面积占全省面积的 81.4%,其中草毡土的粗砂与粉砂比例合计达到 90%以上,仅次于风沙土(95%以上),是较易受风蚀影响的土壤类型。经计算,青海省各类土壤类型中平均 EF 值最高的是风沙土(0.61),主要分布在柴达木盆地和共和盆地两个风沙土集中分布区;其次为寒漠土(0.50)。草毡土虽然从物理属性上具有较高的粗砂粉砂比例而较易受到风蚀影响,但是其较高的有机质和黏粒含量使其在 9 类土壤中可蚀性最低(0.34)(表 1,附图 1)。

(3) 土壤结皮因子 SCF 计算结果。结皮因子主要体现了土壤抗风蚀的能力,与土壤风蚀负相关,因此土壤抗风蚀能力越强,值越小,反之则值越大。经计算,青海省各类土壤类型中抗风蚀能力最强的为粗骨土(0.31),其次为草毡土(0.32),寒钙土也有较高的抗风蚀能力(0.39)。风沙土(0.83)和寒冻土(0.50)则为抗风蚀能力最弱的两类土壤,如表 1,附图 1 所示。

表 1 青海省土壤 EF,SCF 因子计算结果

土壤类型	minEF	maxEF	meanEF	minSCF	maxSCF	meanSCF
草毡土	0.000	0.714	0.341	0.039	0.969	0.323
黑毡土	0.000	0.714	0.423	0.049	0.969	0.412
寒钙土	0.000	0.714	0.465	0.043	0.969	0.388
冷钙土	0.000	0.648	0.437	0.052	0.931	0.395
风沙土	0.075	0.714	0.614	0.057	0.969	0.834
寒漠土	0.432	0.569	0.499	0.279	0.739	0.444
寒冻土	0.000	0.572	0.475	0.039	0.771	0.495
石质土	0.000	0.617	0.479	0.049	0.851	0.423
粗骨土	0.000	0.617	0.460	0.049	0.851	0.313

(4) 植被覆盖因子 C 计算结果。青海省植被因子 C 值结果介于 0.03~1 之间,由于植被因子与土壤风蚀呈负相关,因此植被盖度越高 C 值越低。由附图 1 可见,青海省植被因子 C 值随植被覆盖度的递减由东南向西北不断增高,直至沙地荒漠区增至 1 值附近,表明这些区域由于植被的缺乏而失去了对风蚀的抑制作用。

(5) 地表糙度因子 K' 计算结果。地形因子对风蚀会产生重要的影响^[31]。经计算,青海省巨大的海拔高差和地形起伏产生的地表糙度 K' 值域介于 0.12~0.98 之间,祁连山系的拉脊山、南山、达坂山,昆仑山系的布尔汗布达山、阿尼玛卿山、巴颜喀拉山等山脉分布区域为 K' 的低值区域,这些区域山脉纵横,高山林立,不利于风蚀的发生,而青海两个低海拔的盆地是 K' 的高值区,也是风蚀的主要易发地,如附图 1 所示。

3.2 青海省风蚀模数计算结果分级

WF,EF,SCF,C,K' 等因子计算所得栅格图层依

据公式(1—3)在 ArcGIS 10.0 软件中进行栅格运算,得到各像元年均土壤风蚀模数,按照水利部“土壤侵蚀分类分级标准(SL190—2007)”进行判别,得到青海省风蚀强度等级分布(附图 1)。

根据运算结果统计(表 2),青海省年均风蚀总面积(轻度及以上风蚀等级)为 3 870 万 hm²,约为全省总面积的 53.6%,总风蚀量约 17.8 亿 t。轻度风蚀是青海省主要风蚀类型,发生面积最大,达到了 2 570 万 hm²,占全部风蚀面积的 66.4%。中等以上风蚀面积约为 1 190 万 hm²,其中剧烈风蚀等级面积最大,为 440 万 hm²,平均风蚀强度高达到 45.99 t/(hm²·a)。在空间上,风蚀区域主要分布在青海省西部和中部的柴达木盆地、共和盆地、环青海湖、黄河源区和长江源区,其中中度以上风蚀区集中分布在柴达木盆地周边的海西州、格尔木市、德令哈县、阿克塞县、都兰县、乌兰县以及共和盆地的共和县和贵南县,在这些区域风蚀危害相对严峻。

表 2 风蚀强度分级

等级	轻度	中度	强烈	极强烈	剧烈
分级标准/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	2~25	25~50	50~80	80~150	>150
分布面积/万 hm ²	2570	290	250	210	440
平均风蚀模数/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	8.65	34.68	64.02	108	231.6

3.3 模型验证

本研究是运用 RWEQ 模型在国内区域尺度进行风蚀模数估算的首次尝试,为验证模型结果的准确性,收集了张登山等研究者在青海共和盆地以¹³⁷Cs 法推算风蚀模数的研究成果^[32]与本次计算结果进行了对比(表 3)。

结果显示,模型计算结果与推算结果显示了较好

的拟合性(图 2),说明 RWEQ 模型在国内的运用在理论上是可行的,但大范围运用模型则尚需要根据我国不同的自然地理条件和不同地表生态系统类型开展长期的试验与监测工作,在野外试验数据的支持下对模型因子的计算公式及参数进行进一步的修正和调整,以提高模型运行的精确性。

表 3 ¹³⁷Cs 法与 RWEQ 模型土壤风蚀模数计算结果对比

样点编码	沙地		风蚀地		草地		农田	
	试验值	计算结果	试验值	计算结果	试验值	计算结果	试验值	计算结果
sam1	5518	6858	5899	5281	1683	2160		
sam2					744	148		
sam3					318	432	1825	1658
sam4	3823	3849	5043	4209	1207	1568		

t/km²

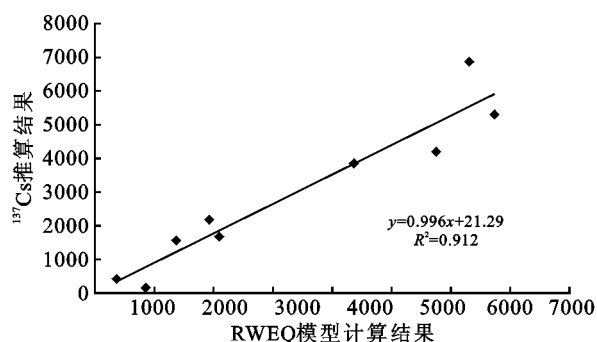


图 2 验证分析

4 结论

(1) 青海省气象因子 WF 为 0.03~36.99 kg/m, 植被因子 C 值为 0.03~1, 地表粗糙度 K' 值为 0.12~0.98, 土壤可蚀因子 EF 为 0~0.714, 土壤结皮因子 SCF 为 0.039~0.969。经 RWEQ 模型计算, 青海省风蚀模数值为 0~373.54 t/hm², 全省年均风蚀总量约为 17.8 亿 t, 平均风蚀强度 45.99 t/(hm² · a)。

(2) 风蚀强度按水利部标准划分为微度至剧烈六个等级, 其中轻度风蚀占全部风蚀面积的 68.4%, 中度以上风蚀为全部风蚀面积的 31.6%, 说明青海全省风蚀以轻度为主, 但在部分区域中度以上甚至剧烈风蚀发生较为集中, 在这些区域风蚀现状较为严峻。

(3) 模型运算结果与青海省 4 个样区的 ¹³⁷Cs 推算结果相对比表明: RWEQ 模型计算结果与试验值具有较高的拟合度 ($R^2 = 0.91$), 说明该模型在青海省的运用是基本可行的。

(4) 扩大模型运用范围和提高运算尺度需要根据我国不同的自然地理条件和不同地表生态系统类型开展长期的试验与监测工作, 在野外试验数据的支持下对模型因子的计算公式及参数进行进一步的修正和调整, 以提高模型运行的精准度。

(5) 各植被类型如草地、农田、灌丛和林地具有不同的抑制风蚀的作用力, 本次研究中尚未考虑这方面的差异和不同, 有待进一步的工作中加以补充和完善。

参考文献:

- [1] Bagnold R A. The physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. London: Methuen and Co., 1941.
- [2] Chepil W S, Milne R A. Comparative study of soil drifting in the field and in a wind tunnel[J]. Sci. Agr., 1939, 19: 249-257.
- [3] Chepil W S. Measurement of wind erosiveness of soils by the dry sieving procedure[J]. Scientific Agriculture, 1942, 23(3): 154-160.
- [4] Chepil W S. Factors that influence clod structure and

erodibility of soil by wind. I: Soil texture[J]. Soil Science, 1953, 75(6): 473-483.

- [5] Chepil W S. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind. II: Water-stable structure[J]. Soil Science, 1953, 76(5): 389-399.
- [6] Chepil W S. Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind. III: Calcium carbonate and decomposed organic matter[J]. Soil Science, 1954, 77(6): 473-480.
- [7] Chepil W S. Influence of moisture on erodibility of soil by wind[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1956, 20(2): 288-292.
- [8] 雅库布夫. 土壤风蚀及其防治[M]. 北京: 农业出版社, 1955.
- [9] Woodruff N P, Siddoway F H. A wind erosion equation[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1965, 29(5): 602-608.
- [10] Woodruff N P, Armbrust D V. A monthly climatic factor for the wind erosion equation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1968, 23(3): 103-104.
- [11] Fryrear D W, Saleh A, Bilbro J D, et al. Field Fsted Wind Erosion Mode[R]. Maragraft Verlag, Weikersheim, Germany; In Proc. of International Symposium Wind Erosion in West Africa: The Problem and Its Control, 1994.
- [12] Pasak V. Wind erosion on soils[M]. VUM Zbraslaav, Scientific Monographs, 1973.
- [13] Gregory J M, Borrelli J. TEAM: Texas erosion analysis model[C]// In proceedings of 1988 wind erosion conference. Texas Tech. University, Lubbock, 1988: 88-103.
- [14] Shao Y P, Raupach M R, Leys J F. A model for prediction Aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region[J]. Australia Journal of Soil Research, 1996, 34: 309-421.
- [15] 董治宝. 建立小流域风蚀量统计模型初探[J]. 水土保持通报, 1998, 18(5): 55-62.
- [16] Hagen L J. A wind erosion prediction system to meet the user need[J]. J. Soil Water Conserv., 1991, 46(2): 107-111.
- [17] 王怡, 李振山, 陈悠. 半干旱区植被风沙动力过程耦合研究: II. 模拟[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1): 31-38.
- [18] Zobeck T M, Parker N C, Haskell S. Scaling up from field to region for wind erosion prediction using a field-scale wind erosion model and GIS[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2000, 82: 247-259.

- 在三川河流域的应用[J]. 水土保持研究, 2006, 12(6): 86-88.
- [5] (SL190—2007)SL. 中华人民共和国水利行业标准: 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 2008.
- [6] Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An Empirical Soil Loss Equation[C]// Proceedings 12th International Soil Conservation Organization Conference: II. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [7] 刘宝元. 西北黄土高原区土壤侵蚀预报模型开发项目研究成果报告[R]. 北京: 水利部水土保持监测中心, 2006.
- [8] 程琳, 杨勤科, 谢红霞, 等. 基于 GIS 和 CSLE 的陕西省土壤侵蚀定量评价方法研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 61-66.
- [9] 孙泽祥, 孙希华, 马倩倩. 基于 CSLE 的淮河流域沂源县土壤侵蚀监测调查研究[J]. 山东师范大学学报: 自然科学版, 2012, 27(1): 94-97.
- [10] 刘宝元. 西北黄土高原区土壤侵蚀预报模型开发项目研究成果报告[R]. 北京: 水利部水土保持监测中心, 2006.
- [11] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington: United States Department of Agriculture, 1978. 58p[R]. Agriculture handbook, 537.
- [12] Peel T C. The relation of certain physical characteristics to the erodibility of soils[J]. Soil Science Society Proceedings, 1937, 2: 79-84.
- [13] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation [J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30: 1387-1396.
- [14] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for steep slopes[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(6): 1835-1840.
- [15] 郭建英, 李锦荣, 刘铁军, 等. 退耕还林工程建设对吴起县土地利用/覆被变化及其土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2013, (5).
- [16] 谢红霞. 延河流域土壤侵蚀时空变化及水土保持环境效应评价研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2008.
- [17] 李勋贵, 魏霞. 区域土壤侵蚀演化风险分析: 以泾河流域为例[J]. 地理研究, 2011, 30(8): 1361-1369.
- [18] 吴发启, 张玉斌, 王健. 黄土高原水平梯田的蓄水保土效益分析[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(1): 34-37.
- [19] 许月卿, 邵晓梅. 基于 GIS 和 RUSLE 的土壤侵蚀量计算: 以贵州省猫跳河流域为例[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(4): 67-71.
- [20] 兰敏. 基于 GIS 的秦巴山区土壤侵蚀空间特征分析: 以陕西省宁强县为例[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 196-200.
- [21] 石生新, 蒋定生. 几种水土保持措施对强化降水入渗和减沙的影响试验研究[J]. 水土保持研究, 1994, 1(1): 66-69.
- [22] 李斌兵, 郑粉莉, 龙栋材, 等. 基于 GIS 纸坊沟小流域土壤侵蚀强度空间分布[J]. 地理科学, 2009, 29(1): 105-110.

(上接第 25 页)

- [19] Van Pelt R S, Zobeck T M, Potter K N, et al. Validation of the wind erosion stochastic simulator(WESS) and the revised wind erosion equation(RWEQ)for single events[J]. Environmental Modelling & Software, 2004, 19: 191-198.
- [20] Feras Youssef, Saskia Visser, Derek Karssenber, et al. Calibration of RWEQ in a patchy landscape: a first step towards a regional scale wind erosion model[J]. Aeolian Research, 2012, 3(4): 467-476.
- [21] 张国平, 刘纪远, 张增祥, 等. 中国风蚀景观面积变化与地表风场强度的关系[J]. 地理学报, 2002, 57(1): 1-10.
- [22] 朱耀东. 免耕条件下前茬作物对残茬盖度的影响[J]. 水土保持应用技术, 2007(3): 21-22.
- [23] 殷海军. RWEQ 模型的改进及其在中国风沙区的应用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
- [24] 张忠孝. 青海地理[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2009.
- [25] 田夏青, 靳雅丽. 青海省风力侵蚀遥感调查与数据库更新[J]. 水利水电工程设计, 2002, 21(2): 51-52.
- [26] 张登山, 高尚玉. 青海高原沙漠化研究进展[J]. 中国沙漠, 2007, 27(3): 367-372.
- [27] 张学元. 青海高寒地区沙化土地治理途径的研究[J]. 中南林业调查规划, 2006, 25(3): 11-14.
- [28] 尚润阳, 祁有祥, 赵廷宁, 等. 植被对风及土壤风蚀影响的野外观测研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(4): 37-39.
- [29] 李军, 游松财. 基于 GIS 的中国陆地表面粗糙度长度的空间分布[J]. 上海交通大学学报, 2006, 24(2): 185-189.
- [30] Shangguan Wei, Dai Yongjiu, Liu Baoyuan, et al. A China Dataset of Soil Properties for Land Surface Modeling[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2013, 5(2): 212-224.
- [31] 李秀霞, 倪晋仁. 土壤侵蚀及其影响因素空间相关性分析[J]. 地理科学进展, 2009, 28(2): 161-166.
- [32] 张登山, 高尚玉, 石蒙沂, 等. 青海高原土地沙漠化及其防治[M]. 北京: 科学出版社, 2009.