

基于土壤侵蚀控制度的黄土高原 水土流失治理潜力研究

高海东¹, 李占斌^{1,2}, 李 鹏¹, 贾莲莲³, 徐国策¹,
任宗萍¹, 庞国伟⁴, 赵宾华¹

- (1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048;
2. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100;
3. 黄河水利委员会黄河上中游管理局, 西安 710021;
4. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127)

摘要: 以整个黄土高原为研究对象, 首先将水土保持措施容量定义为某一区域能容纳的最大适宜水土保持措施量。根据梯田、林地和草地的适宜布设区域, 在地理信息系统(GIS)软件的支持下, 确定了黄土高原的水土保持措施容量。使用修正通用土壤流失方程(RUSLE), 计算了最小可能土壤侵蚀模数和2010年现状土壤侵蚀模数, 并将水土保持措施容量下的最小可能土壤侵蚀模数与现状土壤侵蚀模数之比定义为土壤侵蚀控制度。随后使用土壤侵蚀控制度, 对黄土高原水土流失治理潜力进行了研究。结果显示: 黄土高原2010年现状土壤侵蚀模数为 $3355 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 最小可能土壤侵蚀模数为 $1921 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 土壤侵蚀控制度为0.57, 属于中等水平。相比于现状条件, 在水土保持措施容量条件下, 微度侵蚀区比例从50.48%提高至57.71%, 林草覆盖率从56.74%增加至69.15%, 梯田所占比例由4.36%增加到19.03%, 人均粮食产量可从 $418 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 提高至 $459 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。研究成果对于黄土高原生态文明建设具有一定的指导意义。

关键词: 黄土高原; 土壤侵蚀控制度; 治理潜力; 修正通用土壤流失方程

DOI: 10.11821/dlxb201509012

1 引言

黄土高原是黄河流域的主要组成部分。黄土高原的主要环境问题是严重的水土流失。根据“中国水土流失与生态安全综合科学考察”, 总面积 64 万 km^2 的黄土高原, 土壤侵蚀面积达 39 万 km^2 , 土壤侵蚀模数 $\geq 15000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的剧烈水蚀面积 3.67 万 km^2 , 占全国同类面积的89%^[1]。黄土高原严重的水土流失, 制约了当地社会经济发展并对下游河道行洪安全造成严重威胁, 受到了国内外学者的广泛关注, 暴雨集中、黄土土质疏松、植被覆盖度低以及不合理的人类活动是造成黄土高原土壤侵蚀严重的主要原因^[2-6]。

为了遏制严重的水土流失, 中国政府采取了调整土地利用结构、恢复植被、改进耕作方式、在坡面修建梯田以及在沟道修建淤地坝等一系列水土保持措施^[7-8]。截止2010年^[9],

收稿日期: 2015-02-04; 修订日期: 2015-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401305, 41330858); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金(K318009902-14) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41401305, No.41330858; The open foundation of State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, No. K318009902-14]

作者简介: 高海东(1983-), 男, 内蒙古乌审旗人, 博士后, 讲师, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。

E-mail: hdgao@xaut.edu.cn

通讯作者: 李占斌(1962-), 男, 河南镇平人, 研究员, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: zbli@ms.iswc.ac.cn

已修建各类型淤地坝 9 万多座, 淤成坝地 28.63 万 hm^2 , 修建梯田 281.85 万 hm^2 , 造林 968.28 万 hm^2 。大规模水土保持的实施, 造成黄河输沙量急剧减少, 三门峡 1919-1960 年实测输沙量平均值为 16 亿 t, 而 1990-2007 年降至 6 亿 t, 减少了 10 亿 t, 其中降雨因素减沙占 50%~60%, 水利水保措施作用占 40%~50%^[10]。对于水利水保措施的减沙作用, 国内外学者进行了深入分析, 水保措施主要分为梯田、淤地坝以及退耕还林(草), 而研究区域多集中在黄河中游河龙区间的粗泥沙集中来源区^[11]。如刘晓燕等^[4]认为, 黄土高原水平梯田的减沙作用很可能一直被低估, 有埂水平梯田对流域的减沙潜力可达 65%~90%, 当梯田比大于 35%~40%, 其减沙作用基本稳定在 90% 左右。张晓萍等^[12]研究认为, 黄河中游河龙区间土地利用/覆被变化等人类活动对流域径流减少影响程度超过 50%。而淤地坝的建设, 使流域原有的泥沙输移与沉积关系发生了显著变化。有研究表明^[13], 天然情况下, 黄土高原流域的泥沙输移比一般为 1 左右, 而随着坝库工程的建设, 显著的降低了流域的泥沙输移比, 如无定河流域泥沙输移比降至 0.2~0.4 之间^[14]。

关于流域治理程度的表征, 目前使用的指标主要是水土流失治理程度^[15], 即“在某一流域(区域)内, 水土流失治理措施面积占原有水土流失面积的百分比”。但是治理度并不能准确的反映流域的治理水平, 有的流域水土流失治理程度可能达到 100%, 但是还存在水土流失面积, 还需要进一步治理, 因此治理面积占水土流失面积的比率, 并不能全面反映小流域治理恢复(侵蚀控制)状况。坡耕地占黄土高原耕地总面积的 2/3 左右, 是黄土高原水土流失的主要策源地, 平均土壤侵蚀模数达 $25000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[16]。黄土高原坡耕地主要有两个改造途径, 一是坡改梯, 二是退耕还林(草)。关于黄土高原水土保持治理措施及坡耕地改造潜力研究, 目前报道还较少。

本文以整个黄土高原为研究对象, 首先定义了土壤侵蚀控制度的概念, 并确定了水土保持措施容量的计算方法; 其次分析了整个黄土高原的水土保持措施容量与土壤侵蚀控制度特征; 最后分析了水土保持措施容量下黄土高原土壤侵蚀与土地利用结构变化, 并分析了水土保持措施容量条件下的黄土高原粮食产量水平。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

黄土高原处于东经 $100^{\circ}52' \sim 114^{\circ}33'$, 北纬 $33^{\circ}41' \sim 41^{\circ}16'$ 范围内, 包括青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南 7 个省区, 总面积 64.62 万 km^2 。黄土高原水土流失面积 39.08 万 km^2 , 其中水力侵蚀面积 33.41 万 km^2 、风力侵蚀面积 5.62 万 km^2 、冻融侵蚀 0.05 万 km^2 , 是黄河泥沙的主要来源区, 多年平均入黄泥沙达 14 亿 t。

黄土高原地表的黄土覆盖厚度一般 50~200 m, 地势表现出西北高、东南低。依据地形地貌等自然条件和侵蚀特点, 黄土高原被划分为土石山区、河谷平原区、风沙区、丘陵沟壑区、高塬沟壑区以及土石丘陵林区 6 个类型区(图 1)。气候属大陆性季风气候。多年平均气温 $9 \sim 12^{\circ}\text{C}$, 多年平均降雨量从西北到东南变化于 200~700 mm 之间, 降水量一般集中在 6-9 月, 占全年的 60% 以上, 且以暴雨为主。黄土高原流域面积大于 1000 km^2 的直接入黄支流有 48 条, 全区地表水资源量 105.56 亿 m^3 。植被由东南向西北依次为森林带、森林草原带、典型草原带、荒漠草原和草原化荒漠带。土壤类型以黄绵土为主, 黄绵土颗粒组成以细砂粒和粉粒为主, 剖面质地均一, 整个土体疏松绵软, 容重 $1.1 \sim 1.3 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$, 总孔隙度 50%~60%, 由于严重的水土流失, 土壤质量较低。黄土高原 2011 年总人口 11517.52 万人, 其中农业人口 7547.37 万人, 占总人口的 65.53%, 人口密度为 178.23 人·

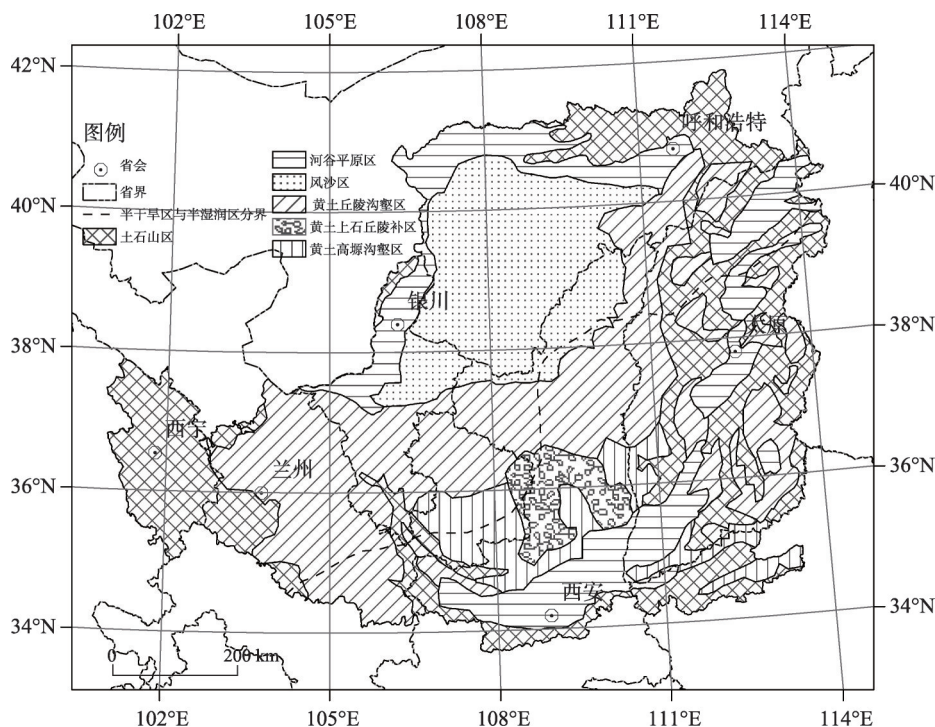


图1 黄土高原分区图

Fig. 1 Zoning map of the Loess Plateau

km⁻²。农民人均纯收入3200元, 经济发展水平较低。

2.2 数据来源

数字高程模型 (DEM) 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站 (<http://www.gscloud.cn>)。该数据集由 ASTER GDEM 第一版本 (V1) 的数据进行加工得来, 投影类型为 UTM/WGS84, 空间分辨率为 30 m。

土壤数据来源于“黑河计划数据管理中心” (<http://westdc.westgis.ac.cn>), 该数据是基于世界土壤数据库 (HWSD) 的中国土壤数据集 (v1.1) [17]。空间分辨率为 1 km, GRID 栅格格式, 地理坐标为 WGS84, 土壤分类系统为 FAO-90。

土地利用数据来源于 2010 年中国 1:10 万土地利用数据库, 该数据库是在 Landsat TM 和中国环境 1 号卫星 (HJ-1) 影像的基础上, 采用人机交互快速提取方法获得。土地利用一级类型综合评价精度为 94%, 二级类型分类综合精度为 91% [18]。在该土地利用分类系统中, 耕地分为水田和旱地两个二级类型。在黄土高原, 旱地还可以进一步分为梯田、坝地以及坡耕地等类型。水浇地面积由各县农业统计公报获得 [19], 梯田和坝地数据由黄河上中游管理局通过遥感解译和统计调查获得 [20]。

降雨数据来自中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>), 本文共收集了黄土高原及周边共 108 个国家气象站点的 30 年以上逐月降雨量资料。

人口数据来源于中华人民共和国公安部治安管理局出版的《中华人民共和国全国分县市人口统计资料 (2011 年)》 [21]。耕地粮食单产数据来源于统计年鉴、文献分析以及实地问卷调查。

2.3 分析方法

2.3.1 土壤侵蚀控制制度的概念

土壤侵蚀控制制度为最小可能土壤侵蚀模数与现状土壤侵蚀

模数之比^[22], 即:

$$r = T_0 / T_s \quad (1)$$

式中: r 为土壤侵蚀控制度, 无量纲; T_0 为最小可能土壤侵蚀模数, 即水土保持措施容量下的土壤侵蚀模数 ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$); T_s 为现状土壤侵蚀模数 ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)。土壤侵蚀控制度介于 0~1 之间, 反映的是对水土保持理想治理状态的接近程度, r 越靠近 1, 表明治理程度越高, r 越靠近 0, 表示治理程度越低, 即偏离理想的治理状态越远。

2.3.2 黄土高原水土保持措施容量 水土保持措施容量定义为某一区域能容纳的最大适宜水土保持措施量, 反映了区域水土保持治理潜力。水土保持措施容量的概念体现了水土保持治理中的“因地制宜”原则。根据不同水土保持措施对立地要求, 找出该措施的全部适宜分布区, 然后进行水土保持措施的布设, 措施布设完成后, 某一区域理论上完成了全部治理工作, 土壤侵蚀模数控制在合理水平, 这种情况下的水土保持措施量, 称之为水土保持措施容量。在水土保持措施的布设中, 存在一个优先级的问題, 在黄土高原, 优先级一般为梯田→林地→草地。当一块立地能同时满足上述三项措施布设时, 优先布设梯田, 其次为林地, 最后为草地。

(1) 黄土高原梯田适宜区 黄土区土层深厚, 在缓坡地区, 坡改梯是主要的坡面治理措施, 本文设定的黄土高原梯田适宜区满足如下条件: 原来为耕地且为丘陵沟壑区和高塬沟壑区, 坡度小于 15° , 而土石山区、风沙区、河谷平原区以及丘陵林区考虑到土层较薄, 坡度需小于 5° 。

(2) 黄土高原林地适宜区 林地生长主要受限于降水条件, 部分学者指出黄土高原宜林区为降雨量大于 400 mm 的地区, 也有部分学者认为, 黄土高原宜林区的降雨量阈值应为 450 mm^[23-24]。半干旱区主要景观为草原, 半湿润区主要景观为森林草原。因此, 本文认为半湿润区及湿润区为林地的适宜分布区, 半干旱区及干旱区为草地的适宜分布区。关于干湿界限, 本文直接使用郑景云等^[25]的气候区划方案。因此, 林地的适宜分布区为: 现有林地; 坡耕地在 5° 以上且处半湿润区的土石山区, 林区, 风沙区, 河谷区; 坡耕地在 15° 以上且处半湿润区的丘陵沟壑区, 高塬沟壑区。

(3) 黄土高原草地适宜区 除了梯田和林地外, 其余地区布设为草地, 因此, 草地的适宜区为: 现有草地; 坡耕地为 5° 以上且处半干旱区的土石山区、林区、风沙区、河谷区; 坡耕地为 15° 以上且处半干旱区的丘陵沟壑区、高塬沟壑区; 沙地。

将上述情景下的水土保持措施布设面积称为水土保持措施容量, 在此基础上计算得到的土壤侵蚀模数定义为最小可能土壤侵蚀模数。使用数字高程模型 (DEM), 提取坡度并重分类为 $0 \sim 5^\circ$, $5 \sim 15^\circ$, $15^\circ \sim 25^\circ$, $> 25^\circ$ 四类, 结合土地利用现状图和气候区划图。在 ERDAS IMAGINE 9.1 软件的空间模型支持下, 使用 Criteria 函数进行判别分析, 得到黄土高原水土保持措施容量。其中梯田 1229.31 万 hm^2 、林地 1248.72 万 hm^2 、草地 3219.16 万 hm^2 , 分别占黄土高原总面积的 19.03%、19.33%、49.82%。

2.3.3 使用 RUSLE 确定土壤侵蚀模数 使用修正通用土壤流失方程 (RUSLE) 并在 ArcGIS 软件支持下确定土壤侵蚀模数^[26], 表达式为:

$$A = R \cdot K \cdot S \cdot L \cdot C \cdot P \quad (2)$$

式中: A 是年平均土壤流失量 ($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$); R 是降雨侵蚀力因子 ($MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$); K 是土壤可蚀性因子 ($t \cdot hm^2 \cdot h \cdot hm^{-2} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$); S 是坡度因子; L 是坡长因子; C 是作物覆盖—管理因子; P 是水土保持措施因子。

(1) 降雨侵蚀力因子 本文采用 Wischmeier 等^[27]提出的由月降雨量计算降雨侵蚀力的经验公式计算多年平均降雨侵蚀力:

$$R = \sum_{i=1}^{12} \left(1.735 \times 10^{1.5 \times \lg \frac{P_i^2}{P} - 0.8188} \right) \quad (3)$$

式中: P 和 P_i 分别为年和月平均降雨量 (mm)。

根据研究区逐月降雨量资料, 使用公式 (3) 计算得到多年平均降雨侵蚀力 R 值。在 GS+7.0 中对 R 值进行半方差函数模拟, 最优模型为高斯模型, 在 ArcGIS 地统计模块下, 使用高斯模型进行普通 Kriging 插值, 获得整个黄土高原的降雨侵蚀力因子 (图 2a)。

(2) 土壤可蚀性因子 (K) 土壤可蚀性 K 值估算采用土壤侵蚀和生产力影响估算模型 (EPIC) 中的方法^[28], 利用土壤有机质和颗粒组成进行估算:

$$K = 0.1317 \times \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256 SAN(1 - SIL/100)]\} \times [SIL/(CLA + SIL)]^{0.3} \times \{1.0 - 0.25C/[C + \exp(3.72 - 2.95C)]\} \times \{1.0 - 0.7SN_1/[SN_1 + \exp(-5.51 + 22.9SN_1)]\} \quad (4)$$

式中: SAN 为砂粒含量 (%); SIL 为粉粒含量 (%); CLA 为粘粒含量 (%); C 为有机碳含量 (%); $SN_1 = 1 - SAN/100$ 。根据黄土高原土壤类型图及其属性数据, 计算获得整个黄土高原的土壤可蚀性 K 值 (图 2b)。

(3) 坡度坡长因子 (LS) 坡度坡长因子 (LS) 计算采用 McCool 等^[29]在 RUSLE 中提出的公式:

$$S = 10.8 \sin \theta + 0.03 \theta < 9\% \quad (5)$$

$$S = 16.8 \sin \theta - 0.5 \theta \geq 9\% \quad (6)$$

$$L = (\lambda/22.1)^m \quad (7)$$

式中: λ 为水平投影坡长 (m); m 为可变坡长指数; θ 为坡度 ($^\circ$)。

利用 zhang 等^[30]开发的流域 LS 因子计算工具, 基于黄土高原 30 m DEM 数据, 首先将黄土高原分为 8 个子区域, 分别计算每个子区域的 LS 值, 拼接后得到整个黄土高原 LS 因子值 (图 2c)。

(4) 作物覆盖-管理因子 (C) 根据张岩^[31-32]、Jiao^[33]等研究, 黄土高原丘陵沟壑区主要农作物的 C 值玉米为 0.28、豆类为 0.51、马铃薯为 0.47、谷子为 0.53。黄土高原 5° 以下缓坡耕地主要作物为玉米和小麦, 其 C 值取 0.25。 5° 以上坡耕地作物以豆类、马铃薯、谷子为主, C 值取 0.40。水田、水域和建筑用地 C 值取 0, 未利用地 C 值取 1。林地和草地根据植被覆盖度的不同 (表 1)。基于 2010 年黄土高原土地利用类型图, 得到黄土高原 C 因子分布图 (图 2d、图 2e)。

表 1 黄土高原不同植被覆盖度的 C 值

Fig. 1 C values at different vegetation coverages in the Loess Plateau

植被覆盖度 (%)	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
林地	0.25	0.12	0.06	0.02	0.004
草地	0.45	0.24	0.15	0.09	0.043

(5) 水土保持措施因子 (P) 由于黄土高原大部分地区土层深厚, 因此梯田是最主要的坡面治理措施。冉大川等^[34]根据黄土高原多地监测资料, 次降雨量在大于 100 mm 而小于 200 mm 之间的降雨几乎可以完全被梯田拦蓄, 而不产生径流。梯田通过拦蓄径流而减少径流对坡面和沟谷的冲刷, 降低土壤侵蚀量。目前研究多集中在梯田的“原位”减沙效应上, 即坡改梯后, 坡地变为梯田后该地块的减沙量。而梯田还存在“异位”减沙效应。主要表现在两方面, 一是梯田可以截留上方含沙水流, 二是经过梯田的坡面径流流速会降低, 从而减轻梯田下部的坡地侵蚀量。刘晓燕等^[4]认为, 由于忽视了梯田的“异位”减沙效应, 从而导致梯田的减沙作用长期以来都可能被低估。梯田的空间布置也会对减沙效益进行影响^[35], 相同面积梯田的布置在空间上服从“上比下好”的规

律。即从减沙效益上,梯田布置在流域纵向分布上,上游比下游好;在同一断面,布置在上部比下部的减沙效果好。

在RUSLE中,使用水土保持措施因子(P)来衡量梯田等水土保持措施对土壤侵蚀的影响。研究表明^[36-37],黄土高原水平梯田的减沙效益可达88%,故水平梯田P值取0.12,其余地类P值取1(图2f)。由于现有土地利用数据没有梯田的空间分布信息,但可以获得黄土高原各县的梯田面积。有学者^[38]提出了使用梯田面积所占土地总面积的比例来推求水土保持措施(P)因子:

$$P=\left(1-\frac{S_t}{S}\times\alpha\right)$$

(8)

式中: S_t 为梯田面积(km^2); S 为土地总面积(km^2); α 为梯田的减沙效益,取0.12。

3 结果与分析

3.1 黄土高原现状土壤侵蚀模数与最小可能土壤侵蚀模数

从黄土高原现状土壤侵蚀模数和最小可能土壤侵蚀模数的空间分布上看(图3),现状土壤侵蚀模数和最小可能土壤侵蚀模数最大的区域集中在黄土高原腹地的丘陵沟壑区和高塬沟壑区。

在ArcGIS中,采用Zonal Statistics工具,统计各分区现状土壤侵蚀模数和最小可能土壤侵蚀模数的平均值(表2)。整个黄土高原现状土壤侵蚀模数平均为 $3355\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,最小可能土壤侵蚀模数平均为 $1921\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,降幅为42.74%。从分区来看,降幅最大的为高塬沟壑区,达51.80%。最低为河谷平原区,为28.98%。

容许土壤流失量是指在长时期内能保持土壤肥力和维持土地生产力所允

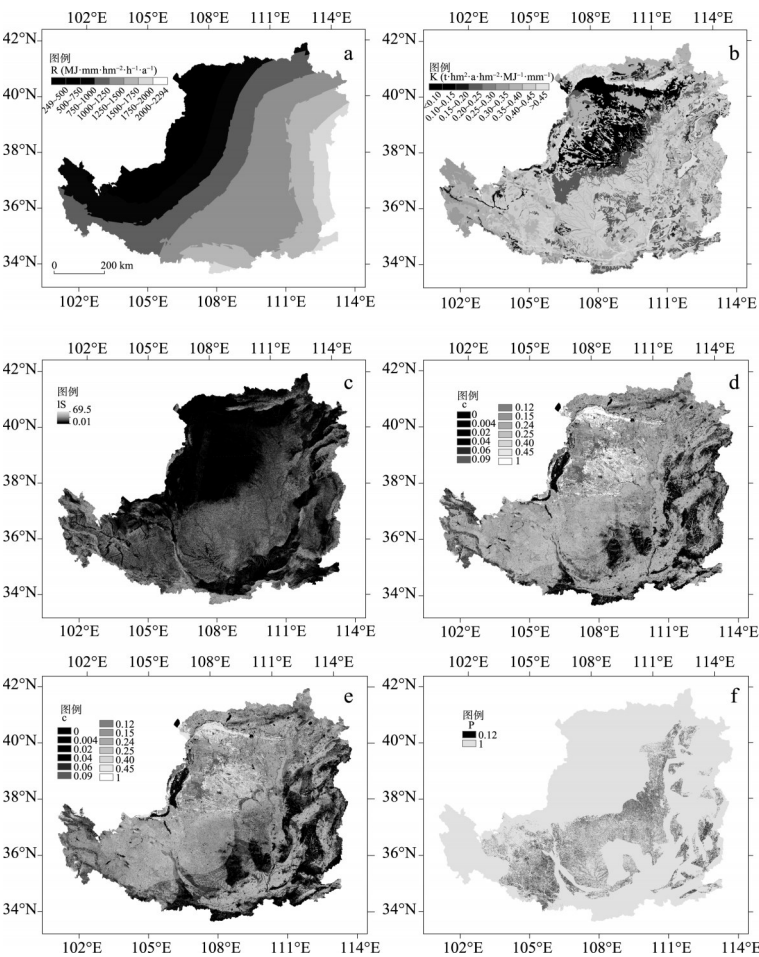


图2 黄土高原RUSLE各因子值(a. 降雨侵蚀力因子(R), b. 土壤可蚀性因子(K), c. 坡度坡长因子(LS), d. 现状条件下覆盖与管理因子(C), e. 水土保持措施容量下覆盖与管理因子(C), f. 水土保持措施因子(P))

Fig. 2 Various factor values from RUSLE for the Loess Plateau (a. rainfall erosivity factor (R); b. soil erodibility factor (K); c. slope length and steepness factor (LS); d. cover-management factor under actual conditions (C); e. cover-management factor under soil and water conservation measures (C); f. support practice factor (P))

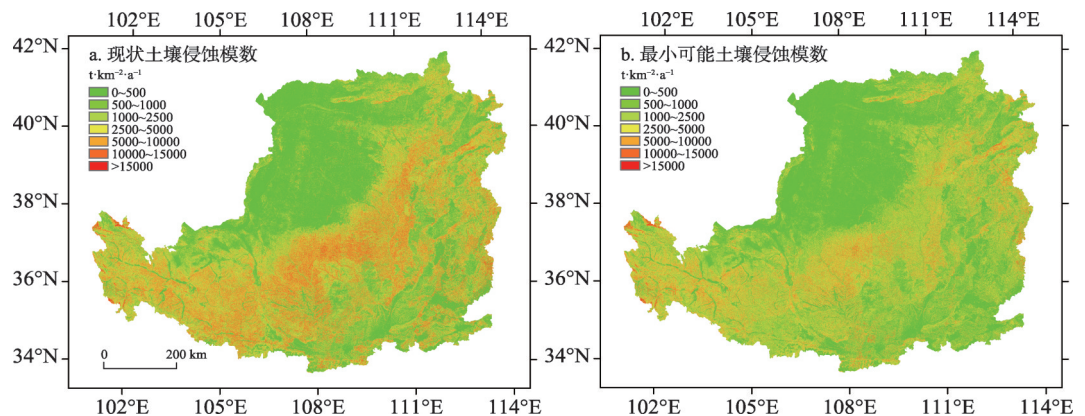


图3 黄土高原现状土壤侵蚀模数和最小可能土壤侵蚀模数

Fig. 3 Actual soil erosion modulus and minimum possible soil erosion modulus in the Loess Plateau

许的最大土壤侵蚀强度^[39], 是一个地区是否产生水土流失的判别标准, 黄土高原容许土壤流失量目前采用的值为 $1000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[40]。土壤侵蚀模数小于 $1000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的地区, 为微度侵蚀区, 一般不需要布设水土保持措施, 土壤侵蚀模数大于 $1000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的地区, 为轻度及以上侵蚀区, 一般需要布设水土保持措施。在水土保持措施容量条件下, 黄土高原最小可能土壤侵蚀模数仍然大于区域的容许土壤流失量 (表2)。笔者统计了现状条件下和水土保持措施容量条件下微度侵蚀区与轻度及以上侵蚀区的比例 (表3)。现状条件下, 黄土高原微度侵蚀区和轻度及以上侵蚀区比例分别为 50.48% 和 49.52%, 水土保持措施容量条件下, 微度侵蚀区比例提高至 57.71%, 相应的, 轻度及以上侵蚀区比例降低至 42.29%。

表2 各分区现状土壤侵蚀模数和最小可能土壤侵蚀模数统计

Tab. 2 Actual soil erosion modulus and minimum possible soil erosion modulus in all zones			
分区	现状土壤侵蚀模数($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	最小可能土壤侵蚀模数($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	降幅(%)
河谷平原区	1377	978	28.98
风沙区	465	311	33.12
黄土土石丘陵林区	3436	1863	45.78
黄土丘陵沟壑区	4997	2477	50.43
黄土高塬沟壑区	5417	2611	51.80
土石山区	3824	2650	30.70
全区	3355	1921	42.74

表3 现状和水土保持措施容量条件下各类型侵蚀比例统计

Tab. 3 Ratios of different erosion types under actual conditions and under soil and water conservation measures				
分区	现状条件下(%)		水土保持措施容量条件下(%)	
	微度侵蚀区	轻度及以上侵蚀区	微度侵蚀区	轻度及以上侵蚀区
河谷平原区	72.89	27.11	75.90	24.10
风沙区	87.27	12.73	90.38	9.62
土石丘陵林区	45.16	54.84	52.77	47.23
丘陵沟壑区	31.66	68.34	43.57	56.43
高塬沟壑区	37.38	62.62	46.58	53.42
土石山区	40.81	59.19	46.94	53.06
全区	50.48	49.52	57.71	42.29

3.2 黄土高原土壤侵蚀控制度

根据土壤侵蚀控制度的概念，计算出整个黄土高原的土壤侵蚀控制度（图4），黄土高原土壤侵蚀控制度平均值为0.57，处于中等治理水平。治理度较高的是河谷平原区、土石山区以及风沙区，土壤侵蚀控制度分别为0.71、0.69和0.67。土石丘陵林区和丘陵沟壑区土壤侵蚀控制度分别为0.54和0.50，处于中等治理水平。而高塬沟壑区治理程度较低，土壤侵蚀控制度为0.48。

从各主要流域统计来看（表4），大黑河、皇甫川、清水河、窟野河以及偏关河土壤侵蚀控制度较高，显示出治理程度较高。而清涧河、无定河、佳芦河以及延河土壤侵蚀控制度较低。

3.3 现状与水土保持措施容量条件下土地利用变化

分别统计现状条件下和水土保持措施容量条件下黄土高原土地利用结构（表5），现状条件下，黄土高原梯田、坡耕地、林地以及草地的比例分别为4.36%、22.35%、14.99%以及41.75%。而在水土保持措施容量条件下梯田、坡耕地、林地以及草地的比例分别为19.03%、0.00%、19.33%以及49.82%。整个黄土高原梯田面积由现状条件下的4.36%，提高至水土保持措施容量条件下的19.03%，林草覆盖率由56.74%提高至69.15%。

3.4 水土保持措施容量下粮食产量变化

根据土地利用解译结果以及梯田和淤地坝调查资料^[20]，黄土高原2010年共有水田58.75万hm²、水浇地288.72万hm²、坝地28.63万hm²、梯田281.85万hm²、坡耕地1443.91万hm²。平均单产分别为水田12000kg·hm⁻²、水浇地6500kg·hm⁻²、坝地4500kg·hm⁻²、梯田2100kg·hm⁻²、坡耕地1050kg·hm⁻²。据此测算，黄土高原现状条件下

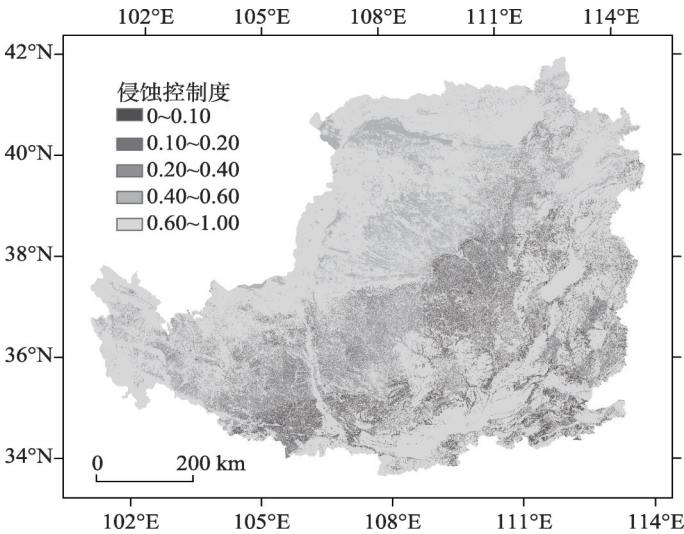


图4 黄土高原土壤侵蚀控制度
Fig. 4 Soil erosion control degree in the Loess Plateau

表4 黄土高原主要流域土壤侵蚀控制度
Tab. 4 Soil erosion control degree in the main watersheds of the Loess Plateau

河流	现状土壤侵蚀模数 (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	最小可能土壤侵蚀模数 (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	土壤侵蚀控制度
祖厉河	5050	3134	0.62
清水河	2718	1849	0.68
大黑河	1802	1536	0.85
偏关河	5358	3496	0.65
岚漪河	5132	3209	0.63
蔚汾河	5452	2834	0.52
皇甫川	2287	1710	0.75
孤山川	3175	1916	0.60
窟野河	1911	1300	0.68
秃尾河	2192	1079	0.49
佳芦河	4356	1767	0.41
无定河	2597	1011	0.39
清涧河	8230	3128	0.38
延河	9531	3871	0.41
北洛河	5292	2877	0.54
泾河	6345	3189	0.50
渭河	4603	2161	0.47

表5 现状以及水土保持措施容量条件下黄土高原土地利用结构

Tab. 5 Land use structure under actual conditions and under soil and water conservation measures in the Loess Plateau

土地利用类型	现状条件下		水土保持措施容量条件下	
	面积(万 hm ²)	比例(%)	面积(万 hm ²)	比例(%)
水田	58.75	0.91	58.74	0.91
水浇地	288.72	4.47	288.72	4.47
坝地	28.63	0.44	28.63	0.44
梯田	281.85	4.36	1229.31	19.03
坡耕地	1443.91	22.35	0.00	0.00
林地	968.28	14.99	1248.72	19.33
草地	2697.69	41.75	3219.16	49.82
其它	693.63	10.73	388.18	6.01

粮食总产量为4818.51万t,坡耕地占整个耕地面积的2/3,但其粮食产量只贡献了1/3。2010年黄土高原总人口为11517.52万,因此,现状条件下人均粮食量为418 kg·a⁻¹。在水土保持措施容量下,水田、水浇地、坝地面积无变化,而梯田面积增加至1229.31万hm²,坡耕地面积减为0,计算得到黄土高原粮食总产量增加至5291.95万t,人均粮食量可提高至459 kg·a⁻¹。

3.5 淤地坝对侵蚀产沙的影响

淤地坝是黄土高原的主要沟道治理工程,在水土保持措施容量中并未考虑淤地坝的适宜规模。这是因为淤地坝对侵蚀影响较小而对产沙影响很大。淤地坝对土壤侵蚀的影响主要表现在两个方面,一是缩短坡长,“淹没”了流域下部土壤侵蚀模数较大的裸坡区域,降低了控制区域土壤侵蚀量;二是通过拦蓄水沙,降低了沟道径流流速,从而减少了淤地坝下游冲刷。使用建立的黄土高原丘陵沟壑区典型坡面,结合RUSLE可以评估淤地坝淤积对坡面土壤侵蚀的影响(图5)。

根据2.3.2计算结果,黄土高原降雨侵蚀力R取1265 MJ·mm·ha⁻¹·h⁻¹·a⁻¹,土壤可蚀性K值取0.040 t·ha·h·ha⁻¹·MJ⁻¹·mm⁻¹。LS因子计算使用公式(5)~(7)。坝地、梯田、坡耕地与草地C值分别取0.25、0.40、0.40以及0.09。梯田的水土保持措施因子P取0.12。

在典型坡面下,无坝地时崩边线上部土壤侵蚀模数为5617 t·km⁻²·a⁻¹,下部土壤侵蚀模数为8528 t·km⁻²·a⁻¹,坡面平均土壤侵蚀模数为6864 t·km⁻²·a⁻¹(图5a)。当有坝地时,设坝地淤积厚度为4.2 m,此时坝地面积占总面积的4.76%,崩边线上部土壤侵

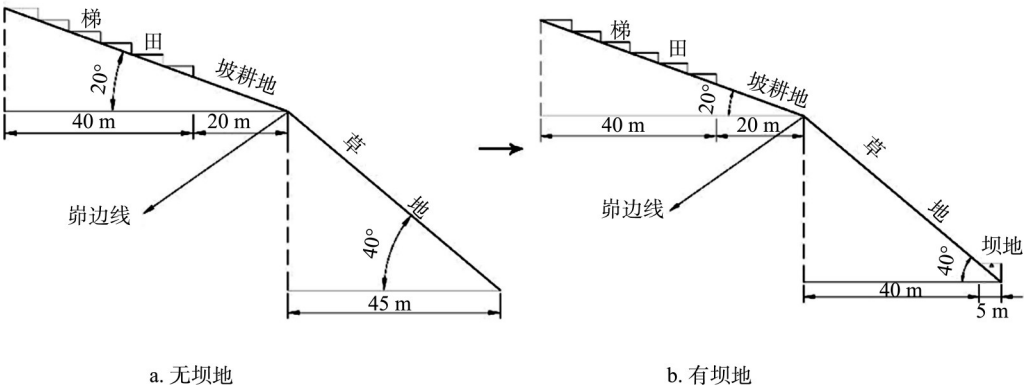


图5 淤地坝淤积对坡面土壤侵蚀的影响
Fig. 5 Effect of deposition of check dams on slope soil erosion

表6 黄河中游主要河流泥沙输移比计算结果

Tab. 6 Sediment delivery ratios in the main rivers in the middle reaches of the Yellow River				
河流(水文站)	输沙量(万 t)	沉积量(万 t)	侵蚀量(万 t)	泥沙输移比
秃尾河(高家川)	1713.51	271.09	1984.60	0.70
大理河(绥德)	2174.56	1119.47	3294.03	0.56
佳芦河(申家湾)	875.37	223.42	1098.79	0.64
岔巴沟(曹坪)	71.75	131.40	203.15	0.33
无定河(白家川)	4930.95	5555.41	10486.36	0.44
孤山川(高石崖)	1208.44	298.25	1506.70	0.59
皇甫川(皇甫)	3203.57	193.59	3397.16	0.87
窟野河(温家川)	6779.99	274.16	7054.15	0.82

蚀模数不变，仍为 $5617\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，下部土壤侵蚀模数降为 $7153\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，坡面平均土壤侵蚀模数降为 $6275\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。与无坝地相比，降幅为8.58%，降幅较低（图5b）。泥沙输移比可以反映淤地坝等水土保持措施对输沙过程的影响。天然情况下，黄土丘陵沟壑区泥沙输移比一般接近于1。根据收集到的黄河中游典型流域骨干坝淤积资料，结合骨干坝、中型坝和小型坝的配置比和控制面积比，计算了典型流域的泥沙输移比（表6）。结果显示，黄河中游典型河流泥沙输移比降至0.62左右。

4 讨论与结论

4.1 讨论

相比于水土流失治理度，土壤侵蚀控制度更能反映出流域的实际治理水平，土壤侵蚀控制度适用于坡面尺度、流域尺度以及区域尺度。在坡面尺度下，通过建立的坡面几何模型^[16]，模拟不同坡面治理条件下的土壤侵蚀量变化，进而确定出最小可能土壤侵蚀模数下的坡面治理方式，结合坡面现状治理，可确定坡面的治理程度。在小流域尺度上，可以获得更精细的土地利用分类结果。例如，可以使用快鸟影像准确分辨出梯田和坡耕地的分布^[41]，甚至可以获得水土保持措施对地形的改变，而水土措施对地形的改变会导致LS因子变化^[22]。同时，在坡面和小流域尺度下，水土保持措施容量的确定更简单准确。因此，可以用来快速评价坡面和小流域的治理程度。在大流域和区域尺度上，土壤侵蚀控制度的计算关键是水土保持措施容量的合理确定。对于整个黄土高原，科学鉴定林地的适宜区域，能提高土壤侵蚀控制度的计算精度。

土壤侵蚀控制度是建立在土壤侵蚀模数的概念之上的。因此，土壤侵蚀模数的准确计算十分重要。土壤侵蚀模数的确定有多种方法，如使用实测的径流泥沙资料、模拟降雨、野外调查、放射性同位素以及数学模型等。本文土壤侵蚀模数的计算使用了修正通用土壤流失方程（RUSLE），虽然最大可能的修正了RUSLE在黄土高原应用的局限性，但是由于中国C值研究较为薄弱，对侵蚀量的计算仍存在一定偏差。同时，由于RUSLE只能计算水力侵蚀模数，而黄土高原部分地区处于风力侵蚀区。由于目前还缺少风蚀水蚀复合土壤侵蚀模数的有效计算模型，因此本文未考虑风蚀模数的变化，导致风沙区土壤侵蚀模数计算偏小。

4.2 结论

整个黄土高原现状土壤侵蚀模数平均为 $3355\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，最小可能土壤侵蚀模数平均为 $1921\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，土壤侵蚀控制度为0.57，处于中等水平。从分区看，治理度较高的是河谷平原区、土石山区以及风沙区，而土石丘陵林区、丘陵沟壑区以及高塬沟壑区

治理程度较低。从流域来看,大黑河、皇甫川、清水河、窟野河以及偏关河土壤侵蚀控制制度较高,而清涧河、无定河、佳芦河以及延河土壤侵蚀控制制度较低。

相比于现状条件下,在水土保持措施容量条件下,整个黄土高原微度侵蚀区比例由50.48%提高至57.71%。林草覆盖率由现状下的56.74%,提高至水土保持措施容量下的69.15%。人均粮食产量由现状条件下的 $418 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 提高至水土保持措施容量下的 $459 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

参考文献(References)

- [1] The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Engineering. Water Loss and Soil Erosion and Ecological Security of China: The Loess Plateau. Beijing: Science Press, 2010: 28-59. [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(西北黄土高原区卷).北京:科学出版社,2010: 28-59.]
- [2] Fu Bojie, Liu Yu, Lu Yihe, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. *Ecological Complexity*, 2011, 8: 284-293.
- [3] Markus Dotterweich. The history of human-induced soil erosion: Geomorphic legacies, early descriptions and research, and the development of soil conservation: A global synopsis. *Geomorphology*, 2013, 201: 1-34.
- [4] Liu Xiaoyan, Wang Fugui, Yang Shengtian, et al. Sediment reduction effect of level terrace in the hilly-gully region in the Loess Plateau. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(7): 793-780. [刘晓燕,王富贵,杨胜天,等.黄土丘陵沟壑区水平梯田减沙作用研究.水利学报,2014, 45(7): 793-780.]
- [5] Sun Wenyi, Shao Quanqin, Liu Jiyuan, et al. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China. *Catena*, 2014, 121: 151-163.
- [6] Wang Fei, Mu Xingmin, Li Rui, et al. Co-evolution of soil and water conservation policy and human-environment linkages in the Yellow River Basin since 1949. *Science of the Total Environment*, 2015, 508: 166-177.
- [7] Zhu Tongxin. Gully and tunnel erosion in the hilly Loess Plateau region, China. *Geomorphology*, 2012, 153/154: 144-155.
- [8] Allison Bullock, Brian King. Evaluating China's slope land conversion program as sustainable management in Tianquan and Wuyi counties. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92: 1916-1922.
- [9] Upper and Middle Reaches of the Yellow River Administrative Bureau. Introduction to the Soil and Water Conservation of Yellow River Basin. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2011:64-96. [黄河上中游管理局.黄河流域水土保持概论.郑州:黄河水利出版社,2011: 64-96.]
- [10] Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources. Yellow River Basin Comprehensive Planning (2012-2030). Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2013: 1-10. [水利部黄河水利委员会.黄河流域综合规划(2012-2030年).郑州:黄河水利出版社,2013: 1-10.]
- [11] Yao Wenyi, Ran Dachuan, Chen Jiangnan. Recent changes in runoff and sediment regimes and future projections in the Yellow River basin. *Advances in Water Science*, 2013, 24(5): 607-616. [姚文艺,冉大川,陈江南.黄河流域近期水沙变化及其趋势预.水科学进展,2013, 24(5): 607-616.]
- [12] Zhang Xiaoping, Zhang Lu, Wang Yong, et al. Tempo-spatially responses of the annual streamflow to LUCC in the middle reaches of Yellow River, China. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(1): 19-26. [张晓萍,张鲁,王勇,等.黄河中游地区年径流对土地利用变化时空响应分析.中国水土保持科学,2009, 7(1): 19-26.]
- [13] Xie Wangcheng, Li Tianhong. Research comment on watershed sediment delivery ratio. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2012, 48(4): 685-694. [谢旺成,李天宏.流域泥沙输移比研究进展.北京大学学报(自然科学版),2012, 48(4): 685-694.]
- [14] Xu Jiongxin, Sun Ji. Effect of erosion control measures on sediment delivery ratio. *Advances in Water Science*, 2004, 15(1): 29-34. [许炯心,孙季.水土保持措施对流域泥沙输移比的影响.水科学进展,2004, 15(1): 29-34.]
- [15] Su Chunli, Liang Yin, Li Decheng, et al. Concept and evaluation methodology of watershed management and recovery degree in red soil region. *Soils*, 2011, 43(3): 466-475. [苏春丽,梁音,李德成,等.红壤区小流域治理度的概念与评价方法.土壤,2011, 43(3): 466-475.]
- [16] Gao Haidong, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Quantitative study on influences of terraced field construction and check-dam siltation on soil erosion. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(5): 946-960.
- [17] Fischer Gunther, Nachtergaele Freddy, Prieler Sylvia, et al. Global Agro-ecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008). IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, 2008, Rome, Italy.

- [18] Liu Jiuyan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2): 195-210.
- [19] National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China County Statistical Yearbook 2012*. Beijing: China Statistics Press, 2012: 10-426. [国家统计局农村社会经济调查司. 中国县(市)社会经济统计年鉴2012. 北京: 中国统计出版社, 2012: 10-426.]
- [20] Yellow River Basin Monitoring Center of Water- Soil Conservation and Eco-Environment. The Middle and Upper Reaches of the Yellow River Survey of Soil and Water Conservation Measures. Xi'an: Upper and Middle Yellow River Bureau, 2011. [黄河流域水土保持生态环境监测中心. 黄河上中游水土保持措施调查报告. 西安: 黄河上中游管理局, 2011.]
- [21] Ministry of Public Security Authority of the People's Republic of China. The National Counties Population Statistics Yearbook 2011. Beijing: Qunzhong Press, 2013: 121-219. [公安部治安管理局. 2011年中华人民共和国全国分县市人口统计资料. 北京: 群众出版社, 2013: 121-219.]
- [22] Gao Haidong, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Concept and calculation methods of erosion control degree: A case study of the Wangmaogou watershed. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(1): 17-24. [高海东, 李占斌, 李鹏, 等. 流域侵蚀控制制度的概念与计算方法: 以王茂沟流域为例. *中国水土保持科学*, 2013, 11(1): 17-24.]
- [23] Jiang Dingsheng. *Soil Erosion and Control Model in the Loess Plateau*. Beijing: China Water & Power Press, 1997: 106-120. [蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 106-120.]
- [24] Li Rui, Yang Wenzhi, Li Bicheng. Research Progress and Prospect of the Chinese Loess Plateau. Beijing: Science Press, 2008: 183-211. [李锐, 杨文治, 李壁成. 中国黄土高原研究与展望. 北京: 科学出版社, 2008: 183-211.]
- [25] Zheng Jingyun, Yin Yunhe, Li Bingyuan. A new scheme for climate regionalization in China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 3-12. [郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 中国气候区划新方案. *地理学报*, 2010, 65(1): 3-12.]
- [26] Kenneth G Renard, George R Foster, Weesies Gleen, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)/U.S. Department of Agriculture Agricultural Handbook No.703. 1997. US Department of Agriculture, Washington, DC.
- [27] Angulo-Martínez M, Beguería S. Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: A comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 2009, 379(1/2): 111-121.
- [28] Williams J R, Jones C A, Kiniry J R. The EPIC crop growth model. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(2): 497-511.
- [29] Don K McCool, George R. Foster, Mutchler C K, et al. Revised slope length factor for the universal soil loss equation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1989, 32: 1571-1576.
- [30] Zhang Hhongming, Yang Qinke, Li Rui, et al. Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor. *Computers & Geosciences*, 2013, 52: 177-188.
- [31] Zhang Yan, Liu Baoyuan, Shi Peijun, et al. Crop cover factor estimating for soil loss prediction. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7): 1050-1056. [张岩, 刘宝元, 史培军, 等. 黄土高原土壤侵蚀作物覆盖因子计算. *生态学报*, 2001, 21(7): 1050-1056.]
- [32] Zhang Yan, Liu Baoyuan, Zhang Qingchun, et al. Effect of different vegetation types on soil erosion by water. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(10): 1204-1209.
- [33] Jiao Juying, Zou Houyuan, Jia Yanfeng, et al. Research progress on the effects of soil erosion on vegetation. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29: 85-91.
- [34] Ran Dachuan. Water and sediment variation and ecological protection measures in the middle reach of the Yellow River. *Resources Science*, 2006, 28(1): 93-100. [冉大川. 黄河中游水土保持措施的减水减沙作用研究. *资源科学*, 2006, 28(1): 93-100.]
- [35] Zhang Yuanxing, Gao Jianen, Shao Hui. The terraced fields environmental impact assessment in data-scarce areas based on the embedded terraced module SWAT model. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2014, 13(2): 283-288.
- [36] Wu Faqi, Zhang Yubin, Wang Jian. Study on the benefits of level terrace on soil and water conservation. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, 2(1): 34-37. [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. *中国水土保持科学*, 2004, 2(1): 34-37.]
- [37] Liu Shiliang, Wang Cong, Zhang Xilai, et al. Soil and water conservation effect of different terrace configurations in land consolidation project. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 59-68. [刘世梁, 王聪, 张希来, 等. 土地整理中不同梯田空间配置的水土保持效应. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 59-68.]
- [38] Xie Hongxia. Study on the spatio-temporal change of soil loss and on the assessment of impacts on environment of soil and water conservation in Yanhe basin [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2008. [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.]

- [39] Li Lan, Zhou Zhonghao, Liu Gangcai. The present situation and some thoughts of soil loss tolerance study. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(10): 1127-1134. [李兰, 周忠浩, 刘刚才. 容许土壤流失量的研究现状及其设想. *地球科学进展*, 2005, 20(10): 1127-1134.]
- [40] Zhang Shijie, Jiao Juying. Soil loss tolerance in the Loess Plateau based on the healthy function of the lower reaches of the Yellow River. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(1): 9-15. [张世杰, 焦菊英. 基于下游河流健康的黄土高原土壤容许流失量. *中国水土保持科学*, 2011, 9(1): 9-15.]
- [41] Li Zhen, Zhang Yan, Zhu Qingke, et al. Assessment of bank gully development and vegetation coverage on the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology*, 2015, 228(1): 462-469.

The capacity of soil loss control in the Loess Plateau based on soil erosion control degree

GAO Haidong¹, LI Zhanbin^{1,2}, LI Peng¹, JIA Lianlian³, XU Guoce¹,
REN Zongping¹, PANG Guowei⁴, ZHAO Binhua¹

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; 3. Upper and Middle Yellow River Bureau, Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, Xi'an 710021, China; 4. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: The capacity of soil and water conservation measures, defined as the maximum quantity of suitable soil and water conservation measures contained in a region, were determined for the Loess Plateau based on zones suitable for establishing terraced fields, forestland and grassland with the support of geographic information system (GIS) software. The minimum possible soil erosion modulus and actual soil erosion modulus in 2010 were calculated using the revised universal soil loss equation (RUSLE), and the rate of the minimum possible soil erosion modulus under the soil and water conservation measures to the actual soil erosion modulus was defined as the soil erosion control degree. The control potential of soil erosion and water loss in the Loess Plateau was studied using this concept. Results showed that the actual soil erosion modulus were $3355 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, the minimum possible soil erosion modulus was $1921 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and the soil erosion control degree was 0.57 (medium level) on the Loess Plateau in 2010. In terms of zones, the control degree was relatively high in the valley plain zones, soil and rock mountainous zones, and windy sand zones, but relatively low in the soil and rock hilly forest zones, hilly gully zones and plateau gully zones. In terms of river basins, the soil erosion control degree was relatively high in the Dahei River, Huangfu River, Qingshui River, Kuye River and Pianguan River basins, but relatively low in the Qingjian River, Wuding River, Jialu River, and Yanhe River basins. The rate of erosion zones with a soil erosion modulus of less than $1000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ increased from 50.48% to 57.71%, forest and grass coverage rose from 56.74% to 69.15%, ratio of terraced fields increased from 4.36% to 19.03%, and per capita grain yield rose from $418 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ to $459 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ under the soil and water conservation measures compared with actual conditions.

Keywords: Loess Plateau; soil erosion control degree; control potential of soil erosion and water loss; RUSLE