

# 黄河中游的侵蚀环境与植被恢复前景

陈 浩<sup>1, 2</sup>, 方海燕<sup>2, 3</sup>, 蔡强国<sup>2</sup>, 周金星<sup>4</sup>, 黄 鑫<sup>2, 3</sup>

(1. 北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环与地表过程重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 4. 中国林业科学研究院林业科学研究所, 北京 100091)

**摘要:** 黄土高原的土壤侵蚀和生态环境问题世界瞩目。在保证蓄水拦沙效益基础上, 提高林、草保存率, 使植被恢复得到最佳的生态效益, 是黄土高原环境整治中亟待解决的关键问题。本文根据黄土高原不同空间地理位置的流域、重点县水文监测资料, 研究了气候、地表覆被、土地利用方式的变化对流域侵蚀产沙的影响以及流域产沙与地理环境要素间的耦合关系, 定量分析了黄土高原, 特别是多沙粗沙区自然与人文要素对流域侵蚀产沙的综合影响和因子的权重分析, 并利用天然降雨植被生态需水适宜性系数和林、草恢复度的概念, 重点探讨了黄河中游主要产沙区、尤其是多沙粗沙区退耕还林等土地利用方式宏观格局变化与植被恢复前景。研究表明, 在植被生长主要依赖天然降雨的黄土高原, 生物措施(植被类型)要与自然带相适应, 应根据植被恢复度和植被生态需水适应性系数来进行宏观植被的恢复与实施。这是目前在不断增长的人口压力下, 进行水土保持, 解决好经济发展与环境保护、减少垦殖率与保证老百姓的基本农田、造林种草与植被类型的自然适应性、以及控制泥沙作用中生物措施与工程措施合理布局等诸多矛盾的关键所在。

**关键词:** 黄河中游; 环境要素; 侵蚀产沙; 植被恢复度; 生态需水适应性

文章编号: 1000-0585(2007)04-0735-11

## 1 引言

黄土高原是世界上土壤侵蚀最为严重的地区之一<sup>[1~4]</sup>。研究表明, 易蚀松散的黄土物质、植被覆盖率低和不合理的土地利用是造成该区严重土壤侵蚀的重要影响因素<sup>[5~7]</sup>。在黄土高原地区, 随着植被覆盖的增加, 土壤侵蚀强度显著降低<sup>[8~10]</sup>。Van Dijk 等研究发现, 适当的植树造林可以使土壤侵蚀降低 40~60%<sup>[11]</sup>。Hawley 等认为当森林覆盖度达到 100% 时, 暴雨侵蚀和重力侵蚀至少减少 70%<sup>[12]</sup>。在美国的犹他州和蒙大纳州, 当地表植被覆盖度从 100% 降低到 1% 时, 土壤侵蚀强度约增加到原来的 200 倍<sup>[13]</sup>。在黄土高原地区, 农业是一种主要的经济活动<sup>[10]</sup>, 新中国成立后, 随着人口的增加, 农地开垦力度加大, 植被破坏严重, 土壤侵蚀强度显著增大<sup>[14]</sup>。虽然早在 20 世纪 50 年代, 我国就开始了黄土高原的环境整治, 经过多年的探索, 对水土流失规律等研究已取得较明显的进展, 在水土保持的理论和治理实践上也取得较明显的成效。但是, 由于种种原因, 目前, 造林保存率仅在 15% 以下<sup>[15]</sup>, 植草保存率则更显不足。黄河中游特别是河口镇-龙门区

收稿日期: 2006-09-15; 修订日期: 2007-04-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 项目(2007CB407207); 国家自然科学基金项目(40635027; 30671721; 40471085); 中国科学院地理科学与资源研究所创新三期领域前沿课题(066U0104SZ)

作者简介: 陈浩(1954), 男, 山东鄄城人, 副研究员。主要从事土壤侵蚀产沙与土壤侵蚀研究。

间的多沙粗沙区, 水利水电工程措施对于流域产沙起到主要控制作用, 生态环境尚未得到根本性改善, 与国家生态安全目标还有一定的距离。如何在保证蓄水拦沙效益基础上, 保证粮食安全的前提下, 提高林、草保存率, 使植被恢复得到最佳的生态效益已成为该区环境整治中亟待解决的关键问题。本文的研究目的就是根据黄土高原的侵蚀环境特点, 揭示自然和人类活动环境要素在流域产沙中的作用, 并利用天然降雨植被生态需水适宜性系数和林、草植被恢复度的概念, 探讨黄河中游重点产沙区退耕还林和粮食作物种植等土地利用方式应该遵循的规律并探讨植被恢复和粮食种植结构的前景问题, 从而为本区土壤侵蚀的治理及其生态安全提供理论依据。

## 2 研究区概况和数据来源

黄河中游从河口镇—潼关区间位于黄土高原半干旱和半湿润地区, 总面积约 28.59 万  $\text{km}^2$  (图 1)。本区的自然环境特点是: 降水从西北向东南逐渐增大, 降雨主要集中在夏季, 并以暴雨的方式为主; 黄土平均粒径从西北向东南逐渐减小; 地貌特征空间差异较大, 除土石山区、泾、洛、渭、汾河下游的黄土阶地区、冲积平原区和西北部干旱草原风沙区及局部的黄土丘陵林区和高原沟壑区的塬面侵蚀轻微外, 其他广大地区呈现出丘陵起伏、沟壑纵横、地形破碎的侵蚀地貌特征。其中, 黄土侵蚀地貌主要由黄土丘陵沟壑区 (约 21 万  $\text{km}^2$ ) 和黄土高原沟壑区 (约 4 万  $\text{km}^2$ ) 组成, 面积约 25 万  $\text{km}^2$ , 水土流失最为严重。每年输入黄河泥沙约占黄河总输沙量的 90%。河口镇—龙门区间两岸有 27 条支流汇入, 其中, 有水文站控制的一级支流 23 条, 面积约 8.84 万  $\text{km}^2$ 。龙门—潼关区间有水文站控制站的黄河一级和二级支流 4 条, 另外泾河和北洛河上游 (西川庆阳站和刘家河水文控制站以上) 纳入多沙粗沙区的支流二条, 共计 29 条。

以 20 世纪 50 年代建站——2002 年最新黄土高原 300 多个县及黄河中游晋陕蒙主要产沙区重点县的统计资料<sup>[16]</sup>, 以及 29 条一、二级支流水文检测资料作为本文的分析样本<sup>[17, 18]</sup>。

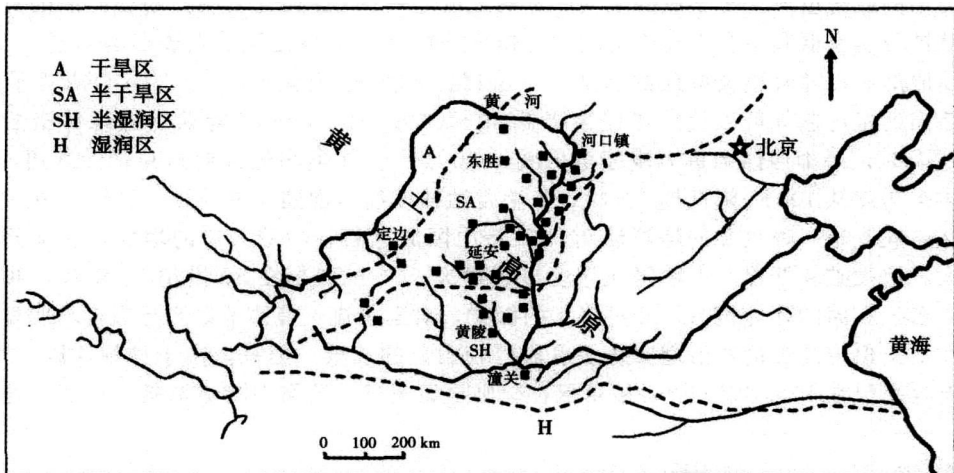


图 1 研究区及重点县位置图

Fig. 1 Location of the study area including key counties

3 结果与讨论

3.1 黄河中游侵蚀产沙环境

黄河中游多沙粗沙区产沙峰值区的形成受该区自然与人类活动要素的综合影响, 图版 2 图 2 表明它在地理空间位置上表现出一定的规律性, 即产沙模数 ( $S$ ) 随着经度的增加, 在纬度方向上存在临界现象, 可用下式描述:

$$S = -3525200 + 37753X - 371.17X^2 + 72352Y - 2674.5Y^2 + 1194.33XY$$
$$r = 0.788 \quad n = 35$$

(1)

式中,  $X$  - 经度 (度, 分);  $Y$  - 纬度 (度, 分);  $r$  - 相关系数;  $n$  - 样本数。

求二阶偏导数可以得到影响侵蚀产沙的纬度、经度权重:

$$\partial^2 S / \partial Y^2 = -5349$$
$$\partial^2 S / \partial X^2 = -742.34$$

(2)

(2) 式显示重点县产沙模数主要受纬度向环境要素的影响。

土壤侵蚀是外界动力因素和地表下垫面抗蚀因素综合作用的结果, 该区水热条件和黄土物质的由西北向东南带状分布特征(图 1), 使得该区不同地理位置产沙模数( $S$ ,  $t/km^2$ )极值区的形成与环境要素呈现出某种对应关系。图版 2 中图 3~ 图 6 表明该区产沙高峰区的形成与该地区自然环境要素:  $> 50\text{ mm}$  暴雨强度出现的次数 ( $P_a$ ,  $mm$ )、黄土面积 ( $H_a$ ,  $km^2$ )、林木覆盖率 ( $V$ ,  $\%$ )、坡面  $> 25^\circ$  面积的百分数 ( $D$ ,  $\%$ ) 和人类活动影响要素: 垦殖率 ( $K$ ,  $\%$ )、 $> 25^\circ$  坡耕地面积百分数 ( $H_d$ ,  $\%$ ) 的作用密切相关, 不同地理位置的环境要素特征可用下列回归方程描述:

$$D = -36896.257 + 629.859X + 125.746Y - 2.941X^2 + 0.536XY - 2.622Y^2$$
$$K = 28281.08 - 637.184X + 347.672Y + 2.907X^2 + 0.068XY - 4.728Y^2$$
$$P_a = 19.773 + 0.112X - 1.531Y + 0.001XY + 0.017Y^2$$
$$H_d = -18042.79 + 370.616X - 119.474Y - 2.249X^2 + 3.269XY - 3.203Y^2$$
$$V = -22060.08 + 533.685X - 376.556Y - 2.566X^2 + 0.833XY + 3.633Y^2$$

(3)

将式 (3) 求偏导数可以得到不同地理位置 (经度、纬度) 环境要素的变化速率, 由表 1 所示, 除  $D$  的经向影响略大于纬度外, 其他不同方向环境要素的影响速率均是纬度大于经度, 与影响重点县侵蚀产沙的空间位置相一致。式 (3) 表明, 黄河中游产沙高峰区的形成是地理环境要素综合作用下的地表空间侵蚀分异的复杂响应。

表 1 经、纬度方向的地理环境要素变化速率

Tab 1 Changing rates of environmental factors in the latitudinal and longitudinal directions

项目		D	K	$P_a$	$H_d$	V
速率	经度 X	5.882	5.817	0	4.498	5.132
	纬度 Y	5.244	9.456	0.034	6.406	7.266

根据黄河中游环境要素与产沙模数的耦合关系, 利用 2 次多项式回归分析方法, 经相关显著性检验, 保留显著项, 可以得到影响重点县产沙模数与地理环境要素综合作用下的过程响应模型:

$$S = -22116 + 33.09H_a - 0.0237H_a^2 + 13.19D - 0.098D^2 + 34.875V - 2.369V^2 + 34802P_a - 18216P_a^2 + 597.99K - 5.433K^2$$
$$r = 0.707 \quad n = 35$$

(4)

将式 (4) 求一、二次偏导数, 可得到影响重点县产沙模数变化的环境要素权重。

$$\begin{aligned} \partial S / \partial H_a &= 33.09 - 0.0474 H_a & \partial^2 S / \partial H_a^2 &= -0.047 \\ \partial S / \partial D &= 13.19 - 0.196 D & \partial^2 S / \partial D^2 &= -0.196 \\ \partial S / \partial V &= 34.875 - 4.738 V & \partial^2 S / \partial V^2 &= -4.738 \\ \partial S / \partial P_a &= 34802 - 36432 P_a & \partial^2 S / \partial P_a^2 &= -36432 \\ \partial S / \partial K &= 597.99 - 10.87 K & \partial^2 S / \partial K^2 &= -10.87 \end{aligned} \quad (5)$$

上式解之得:

$H_a = 698 \text{ km}^2$ ,  $D = 67.29\%$ ,  $V = 7.36\%$ ,  $P_a = 95.6\%$ ,  $K = 55.01\%$ , 以上各值是影响重点县产沙模数极值的综合环境要素的复合临界阈值。

由 (5) 式可以看出, 影响产沙模数的权重依次为  $P_a$ 、 $K$ 、 $V$ 、 $D$ 、 $H_a$ 。在影响黄河中游侵蚀产沙的环境要素中  $> 50 \text{ mm}$  暴雨的次数排在首位, 垦殖率和林木覆盖率的影响排在二、三位。产沙极值区的形成在于为数不多的次大暴雨, 以及人类活动影响下垦殖率的过大和林木覆盖率的过低。按  $> 25^\circ$  坡耕地必须退耕推算, 重点县平均有  $16.88\%$  的坡耕地可以得到植被恢复, 也就是说可以减少  $4.63\%$  的垦殖率。从影响黄河中游多沙粗沙区侵蚀要素的作用来看, 目前, 人类还难以控制气候的变化, 但通过沟道工程措施保证基本农田 (沟道坝地一般可占小流域面积的  $10\%$  以下), 在人口密度大、 $< 25^\circ$  的坡面修筑水平梯田, 最大程度地退耕还林 (草) 及减小垦殖率已成为抑制本区侵蚀产沙的关键。

### 3.2 土地利用方式与植被恢复

水分是制约黄土高原地区植被恢复与生态环境重建的决定性因子<sup>[19]</sup>。黄土高原植被建设过程中林草衰败的主要原因是由于土壤水分亏缺。从宏观上按生物气候带特征来说, 乔、灌、草配置结构不合理; 从一个流域的垂直空间不同地形部位来说, 乔、灌、草配置结构的不合理; 另外是耐旱树 (草) 种的选用、管理和养护等问题<sup>[20]</sup>。黄土高原地区的生物措施及林草所需的水分条件主要依赖于大气降水, 要做到生物、工程措施的合理配置, 就要充分认识不同空间尺度、不同自然带乔、灌、草结构合理配置问题。熊贵枢等人认为, 乔木林分布在年降雨量大于  $550 \text{ mm}$  地区, 灌丛草分布在  $400 \sim 550 \text{ mm}$  地区,  $300 \sim 400 \text{ mm}$  分布在草原区<sup>[21]</sup>。陈浩等人研究表明, 黄河中游林、灌草空间分布的临界年降雨量的界线为  $530 \text{ mm}$ <sup>[22, 23]</sup>。以上地理环境要素与侵蚀产沙的耦合关系分析表明, 在决定地表抗蚀力的诸要素中人类活动因子垦殖率排在首位, 植被覆盖率排在次位。在不断增长的人口压力下, 解决好经济发展与环境保护、增加植被覆盖与保证老百姓的基本农田以及泥沙控制中生物措施与工程措施合理布局等矛盾, 使该地区的生态与环境得到质的飞跃, 人类活动应起到关键作用。

**3.2.1 林、草植被的恢复度** 林草植被恢复度是指单位面积上 (流域、县域) 林草植被恢复的程度, 可用下列方程表示:

$$V_c = (V + C + T) = (V_d + C_d + T_d) / A \quad (6)$$

式中:  $V_c$ —林草恢复度 (%);  $V$ —林木覆盖度 (%);  $C$ —草地覆盖度 (%);  $T$ —退耕坡地占土地总面积百分数 (%);  $V_d$ —林地面积 ( $\text{km}^2$ );  $C_d$ —草地面积 ( $\text{km}^2$ );  $T_d$ —退耕坡地的面积 ( $\text{km}^2$ );  $A$ —土地总面积 ( $\text{km}^2$ )。

根据水土保持法, 黄河中游产沙重点县的退耕对象主要是指  $> 25^\circ$  坡耕地退耕面积, 根据需要也可以是某一区域实际退耕面积, 以及某种土地利用方式改变后实际的退耕的面积。根据黄河中游产沙重点县  $> 25^\circ$  坡耕地必须退耕计算, 退耕区域与产沙模数的峰值区

基本对应 (图版 2, 图 6), 也就是说, 产沙高峰区基本与  $> 25^{\circ}$  退耕区范围相一致。黄河中游植被恢复度平均达到 54.6%, 植被平均增加了 4.63%, 单县最大可达 85% 以上。若按  $> 15^{\circ}$  坡耕地退耕计算, 预计植被恢复度平均将达到 61.39%, 增加 12.44% 退耕还林 (草) 土地, 平均占耕地面积的 34.39% (表 2)。由图版 2 图 7 所示, 若按目前的土地利用方式, 仅  $> 25^{\circ}$  的坡耕地退耕, 黄河中游三维空间植被恢复度呈马鞍型, 黄河中游的植被恢复主要是分布在经度方向, 而纬度方向的植被恢复度较小。

表 2 重点县平均退耕面积情况和平均植被恢复度

Tab 2 Condition of mean deformed land area and mean vegetation recovered							
项目名称	林草覆盖度 (%)	退耕地占总耕 地面积(%)	退耕地占总耕 地面积(%)	退耕地占总 土地面积(%)	退耕地占总 土地面积(%)	恢复度(%)	恢复度(%)
		$> 15^{\circ}$	$> 25^{\circ}$	$> 15^{\circ}$	$> 25^{\circ}$	$> 15^{\circ}$	$> 25^{\circ}$
最大	84.87	71.56	37.27	32.6	21.34	89.6	88.17
平均	50.7	34.39	10.2	12.44	4.63	61.39	54.6
最小	20.2	0.38	0.92	0.06	0.08	36.6	23.76

据作者研究<sup>[22]</sup>, 在黄河中游河口镇-潼关区间, 当林木覆盖率从临界值 (产沙模数极值) 增加至产沙模数峰末值 22.26% 后减沙作用明显并趋于稳定。据资料分析, 林木覆盖率  $V = 22.26\%$  时对应的年降雨量约为 511.6 mm, 当年降雨量大于 511.6 mm 后林木覆盖速率增加明显。这个林木覆盖率产沙拐点与林、草主要作用地带临界年降雨量 530 mm 相接近。因此, 在黄土高原生物工程建设中, 年降雨量大于 530 mm 地区应以林木的恢复为主, 在风蚀草原区要以封禁自然恢复为主。要有效地控制半干旱区, 尤其是丘陵沟壑区的土壤侵蚀, 使产沙模数降到  $6000 \text{ t/km}^2$  以下, 仅靠林木自然恢复困难较大, 主要原因是受天然水环境特征的限制。在多沙粗沙区达到  $6000 \text{ t/km}^2$  以下, 已跨越了 530 mm 天然降雨界线, 达到约 560 mm, 林木覆盖率要达到 30%, 超出了自然带植被自然生产力的水平。特别是在年降雨量 400~450 mm 的半干旱区, 要增加相当近 100~150 mm 天然雨量相当困难。在年降雨量 450~530 mm 地区, 根据植被生长的立地条件, 坡面上也难成林, 退下的陡坡耕地适于种灌、草。因此, 在降雨量小于 530 mm 地区,  $> 25^{\circ}$  退耕地仅能以灌草恢复为主。统计资料显示, 在黄土丘陵沟壑产沙峰值区, 退耕地面积较大, 灌草恢复占土地总面积的 14%~30% 之间, 若以  $> 15^{\circ}$  坡耕地全部退耕, 灌草恢复可占总土地面积的 20%~52%, 减沙效果可观。南部年降雨量大于 530 mm 地区, 以林木恢复为主。在毛乌素沙地高原的内陆河地区如伊金霍洛旗、达拉特、准格尔旗等草原区、以沟蚀为主的砒沙岩出露区域,  $> 25^{\circ}$  坡耕地、 $> 25^{\circ}$  坡地百分数均接近于 0, 耕地主要是以  $< 15^{\circ}$  的缓坡耕地为主。由于该区为黄河下游的粗泥沙来源区, 流域泥沙来源主要以沟谷侵蚀为主。因此, 该地区的植被恢复应以缓坡耕地和沟谷荒坡的恢复为主, 对于该区进行沟道工程措施的重点整治是必要的。

3.2.2 天然降雨植被生态需水适宜性 黄土高原的林草植被和坡耕地农作物的生长区是主要依赖天然降雨的地区, 植被重建和农作物耕作必须遵循适地性的生态性原则。适地性就是不考虑灌溉, 采用地下水, 当地社会经济情况等前提下, 林草植被、农作物的生长与生长期的水分供应量与满足植物、作物生长期需要的天然降雨量的大小相适应。生态用

水是指维持各类生态系统正常发育与相对稳定必需消耗和现存的水分。本文农作物和林草植被生态需水适应性是指,在黄河中游某一区域(县域、流域),满足依赖天然降雨的农作物生长期和生物自然带林草植被生态用水所需的天然降雨量,衡量区域生态需水的适应性本文用生态需水适应性系数描述。

(1) 天然降雨的农作物生态需水适应性

黄土高原主要为旱地“雨养”农业区,作物生长所需水分主要依赖天然降水。产沙重点县主要位于黄河中游的多沙粗沙区(图1),其粮食产量为黄土高原地区的中低产区。据杨文治等人的研究,谷子、糜子、玉米和高粱是黄土高原主要粮食秋作物,其播种面积占粮食总面积的50%,其中90%种植在旱地上<sup>[24]</sup>。

天然降雨的农作物生态需水适应性系数( $W$ )是指在不考虑灌溉、采用地下水、当地社会经济情况等为前提下,农作物生长期满足生长需要的天然降雨的盈亏量,可用下式表示:

$$W = P_s / P_x \tag{7}$$

式中:  $P_s$ — 作物生长期降雨量(mm);  $P_x$ — 作物生长期需水量(mm)。当  $W \geq 1$  时,农作物生态需水盈余;  $W < 1$  时,作物生长期生态需水亏缺。根据黄土高原不同自然带36个县的统计分析<sup>[3]</sup>,4种农作物(夏播谷子、春播玉米、冬小麦和冬小麦套玉米)的  $W$  与  $P_s$  呈密切的线性相关(图8):

夏播谷子: $W = 0.078 + 0.003P_s$	$r = 0.867$
春播玉米: $W = 0.043 + 0.0019P_s$	$r = 0.842$
冬小麦: $W = 0.250 + 0.0015P_s$	$r = 0.864$
冬小麦套玉米: $W = 0.056 + 0.0014P_s$	$r = 0.867$

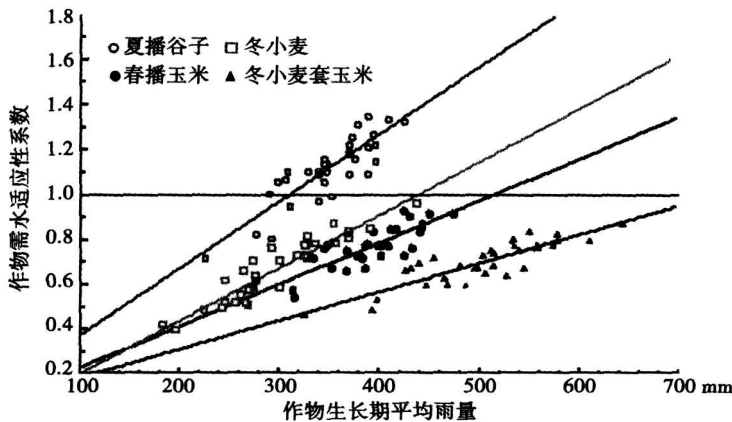


图8 黄河中游作物生长期平均降雨量与农作物生态需水适应性系数的关系

Fig 8 Relationship between mean precipitation during growing period of crops and adapting coefficient of ecological water requirement( $W$ ) in the middle Yellow River

图8表明,大多数地区夏播谷子满足生长期的用水需要外,其他作物均满足不了生长期的用水需要。夏播谷子是适宜在年均生长期降雨量大于300 mm地区黄土坡耕地耕种的作物,生长期雨量小于300 mm的地区,坡耕地应以糜子、高粱作物为主。以上表明,黄

河中游大部分旱坡耕地农作物在生长期内不能满足充分生长的生态用水的要求, 在调整土地利用结构中, 应注重旱坡耕地作物类型生长期生态需水适宜性问题。

(2) 天然降雨林草植被生态需水适应性

朱志辉 (1988) 根据生态学、气候学等方法估算了黄土高原地区自然植被净初级生产力指标 ( $D_{nn}$ ), 利用  $D_{nn}$  的大小作为黄土高原各县自然植被的空间分布状况的分析指标<sup>[25]</sup>:

$$D_{nn}= A_0R_n/d(1+ \beta)$$
 (8)

式中:  $R_n$ — 年净辐射量;  $d$ — 水汽饱和差;  $\beta$ — 鲍恩比;  $A_0$ — 与气孔和冠层阻力、空气中二氧化碳等有关的常数。由于  $d$  和  $\beta$  随辐射干燥度  $R_{di}$  的增加而增大, 据式 (8) 可以得到以下形式的半经验关系:

$$D_{nn}= 0.29[\exp(-0.216(R_{di})^2)] R_n$$
 (9)

式中:  $R_n$ — 年净辐射。

研究表明<sup>[22]</sup> 黄河中游产沙重点县、流域的自然植被生产力  $D_{nn}$  与多年平均降雨量  $P$  存在极密切的非线性相关。据此我们将天然降雨植被生态需水适宜性系数 ( $W$ ) 定义为单位年降雨深度上的植被自然生产力, 即, 单位年降雨深度上, 不同生物自然带单位时间、单位面积上的植被生产力, 用下式表示:

$$W= D_{nn}/ P$$
 (10)

黄土高原及黄河中游产沙重点县天然降雨植被生态需水适宜性系数与不同自然带年降雨量的关系密切相关, 并可用下式描述 (图 9):

$$W= 1/(0.611+ 24.88 \times 1.0123^{-P}) \quad r= 0.984 \quad n= 281$$
 (11)

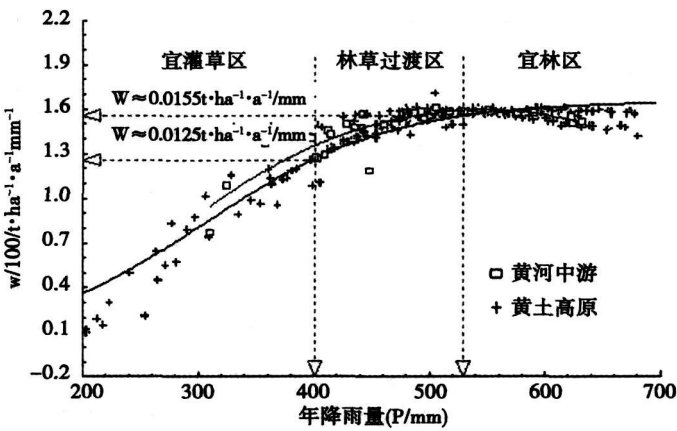


图 9 黄河中游植被生态需水适宜性系数的空间分布

Fig 9 Spatial distribution of adapting coefficient of eco-water requirement for vegetation(  $W$ ) in the middle Yellow River

研究发现年降雨量 $< 400$  mm 为宜灌草区,  $400\sim 530$  mm 为林草过渡区,  $> 530$  mm 为宜林区<sup>[3]</sup>。图 9 表明, 对应年降雨量  $400$  mm 和  $530$  mm 的天然降雨植被生态需水适宜性系数临界值分别为  $W \approx 0.0125t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}/mm$  和  $W \approx 0.0155t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}/mm$ 。年降雨量

大于 400 mm 的地区天然降雨植被生态需水适宜性系数变化幅度不大; 位于多沙粗沙区年降雨量 400~ 450 mm 地区, 天然降雨满足灌草植被的自然恢复; 450~ 530mm 地区能满足林木在水分条件较好的沟谷自然恢复。

为了分析林草植被生态需水的恢复目标和与目标恢复期相比生态需水的盈亏量, 这里引用林草植被目标生态需水适应性系数的概念, 即与标准目标期相比, 由于天然降雨量的增与减, 致使不同生物自然带林草植被适应性系数的生态需水出现盈亏量 ( $W_p$ ):

$$W_p = \frac{W_h}{W_b} \tag{12}$$

$$W_h = \frac{P_h}{P_b} \times W_b \tag{13}$$

式中:  $W_b$ —标准期林草植被生态需水适应性系数;  $W_h$ —20 世纪 70 年代后不同时期林草植被生态需水适应性系数的增减量;  $P_b$ —标准期降雨量;  $P_h$ —20 世纪 70 年代后不同时期年降雨量;  $W_p \geq 1$  时, 与标准期相比, 林草植被生态需水盈余;  $W_p < 1$  时, 与标准期相比, 林草植被生态需水亏缺。图 10 表明, 与标准期相比, 20 世纪 70 年代以后, 黄河中游的流域林草植被生态需水出现了亏缺的状态, 20 世纪 80 年代, 植被生态需水亏缺最大, 90 年代的生态需水有所增加, 林草植被生态需水一些年度出现盈余。从黄河中游流域林草植被生态需水盈亏的时间变化可以看出, 70 年代天然降雨的减少和植被生态需水的亏缺, 是黄土高原造林、种草保存率低的重要原因。

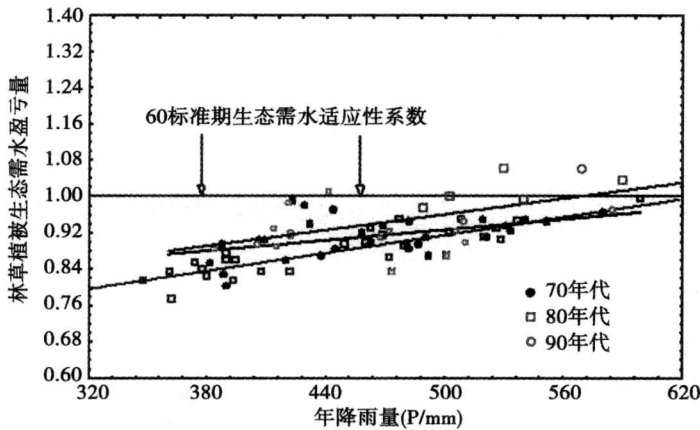


图 10 黄河中游植被生态需水盈亏随时间的变化

Fig. 10 Temporal changes of profit and loss of eco-water requirement for vegetation ( $W_p$ ) in the middle Yellow River

## 4 结论

本文通过研究气候、地表覆被、土地利用方式的变化对流域侵蚀产沙的影响, 以及流域产沙与地理环境要素间的耦合关系, 定量分析了黄土高原特别是多沙粗沙区, 自然与人文要素对流域侵蚀产沙的综合影响和因子的权重, 并利用天然降雨植被生态需水适宜性系数和林、草恢复度的概念, 重点探讨了黄河中游主要产沙区, 尤其是多沙粗沙区退耕还林等土地利用方式宏观格局变化与植被恢复前景。研究结果认为: 黄河中游产沙极值区的形



成在于为数不多的次大暴雨, 以及人类活动影响下垦植率的过大和林木覆盖率的过低。按  $> 25^\circ$  坡耕地必须退耕推算, 重点县平均有 16.88% 的坡耕地可以得到植被恢复, 也就是说可以减少 4.63% 的垦殖率; 根据黄河中游产沙重点县  $> 25^\circ$  坡耕地必须退耕计算, 退耕区域与产沙模数的峰值区基本对应, 也就是说, 产沙高峰区基本与  $> 25^\circ$  退耕区范围相一致。黄河中游植被恢复度平均达到 54.6%, 植被平均增加了 4.63%, 单县最大可达 85% 以上。若按  $> 15^\circ$  坡耕地退耕计算, 预计植被恢复度平均将达到 61.39, 增加 12.44% 退耕还林(草)土地, 平均占耕地面积的 34.39%; 黄土高原及黄河中游产沙重点县天然降雨植被生态需水适宜性系数与不同自然带年降雨量密切相关, 对应年降雨量 400 mm 和 530 mm 的天然降雨植被生态需水适宜性系数临界值分别为  $W \approx 0.0125 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1} / \text{mm}$  和  $W \approx 0.0155 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1} / \text{mm}$ 。

## 参考文献:

- [1] Douglas I Land degradation, soil conservation and the sediment load of the Yellow River, China: Review and assessment. *Land Degrad Rehabil*, 1989, 1: 141~ 151.
- [2] 陈浩, SUI Y T, 蔡强国, 等. 沟道流域坡面与沟谷侵蚀演化关系——以晋西王家沟小流域为例. *地理研究*, 2004, 23(3): 329~ 338.
- [3] Xu J X Erosion caused by hyperconcentrated flow on the Loess Plateau of China. *Catena*, 1999, 36: 1~ 19.
- [4] He X B, Zhou J, Zhang X B, *et al.* Soil erosion response to climatic change and human activity during the Quaternary on the Loess Plateau, China. *Environ. Change*, 2006, 6: 62~ 70.
- [5] Fu B J Soil erosion and its control in the Loess Plateau of China. *Soil Use Manage*, 1989, 5: 76~ 82.
- [6] Fu B, Gulnick H. Land evaluation in the Loess Plateau of sever erosion: The Loess Plateau of China. *Land Degrad Rehabil*, 1994, 5: 33~ 40.
- [7] 陈浩. 降雨径流对大理河流域系统泥沙输移比的影响. *水土保持学报*, 2000, 14(5): 19~ 27.
- [8] Shi H, Shao M A. Soil and water loss from the Loess Plateau in China. *Journal of Arid Environment*, 2000, 45: 9~ 20.
- [9] 陈浩, 周金星, 陆中臣, 等. 黄河中游流域环境要素对水沙变异的影响. *地理研究*, 2002, 21(2): 179~ 187.
- [10] Zheng F L Effect of Vegetation Changes on Soil Erosion on the Loess Plateau. *Pedosphere*, 2006, 16: 420~ 427.
- [11] Van Dijk P M, Kwaad, F J P M, Klapwijk M. Retention of water and sediment by grass strips. *Hydrological Processes*, 1996, 10: 1069~ 1080.
- [12] Hawley L G, Dymond J R. How much do trees reduce landsliding? *J Soil Water Conserv*, 1988, 43: 495~ 498.
- [13] Pimentel D, Kounang N. Ecology of soil erosion in ecosystems. *Ecosystems*, 1998, 1: 416~ 426.
- [14] Shi H, Shao M A. Soil and water loss from the Loess Plateau in China. *Journal of Arid Environments*, 2000, 45: 9~ 20.
- [15] 王正秋. 黄土高原造林中几个问题的思考. *中国水土保持*, 2000, (4): 37~ 39.
- [16] 中科院黄土高原综合科学考察队. 黄土高原地区资源环境社会经济数据集. 北京: 中国经济出版社, 1992. 179.
- [17] 黄河上中游管理局. 黄河流域水土保持基本资料. 郑州: 黄河水利出版社, 2001. 1~ 3.
- [18] 王乃彬. 黄土高原区资源与环境遥感调查数据集. 西安: 西安地图出版社, 1991. 147~ 157.
- [19] 顾文书. 黄河水沙变化及其影响的综合分析报告(第一期). 见: 汪岗, 范昭. 黄河水沙变化研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2002. 1~ 45.
- [20] 唐克丽. 黄土高原生态环境建设关键性问题的研讨. *水土保持通报*, 1998, 13(1): 1~ 7.
- [21] 熊贵枢, 李世明, 徐建华, 等. 黄河河口镇至龙门区间水沙变化. 见: 汪岗, 范昭. 黄河水沙变化研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2002. 74~ 127.
- [22] 陈浩, 陆中臣, 李忠艳, 等. 流域产沙中的地理环境要素临界. *中国科学(D辑)*, 2003, 10: 1005~ 1012.
- [23] Chen H, Zhou J X, Cai Q G. Influences of vegetation restoration on watershed erosion and sediment yield and the prospects of integrated treatment middle Yellow River. *Science in China (Series D)*, 2006, 36(1): 69~ 80.

- [24] 杨文治, 余存祖. 黄土高原区域治理与评价. 北京: 科学出版社, 1992 101~ 102
- [25] Zhu Z H. A model for estimating net primary productivity of natural vegetation Scientific Bulletin, 1993, 38(22): 1913~ 1917

## The impact of environmental variables on sediment yield and vegetation recovering prospect in the middle Yellow River

CHEN Hao<sup>1,2</sup>, FANG Hai-yan<sup>2,3</sup>, CAI Qiang-guo<sup>2</sup>, ZHOU Jin-xing<sup>4</sup>, HUANG Xin<sup>2,3</sup>  
 (1 Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combat(Beijing Forest University),  
 Ministry of Education, Beijing 100083, China; 2 Key Laboratory of Water Circle and Related Land Surface  
 Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;  
 3 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
 4 The Reseach Institute of Forest Science, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** Soil erosion and eco-environment on the Loess Plateau are among the most serious problems in the world. To improvements of the vegetation coverage and ecological efficiency are the key issues to be settled urgently in future in the context of erosion control and food security. According to the data from the key counties with different spatial locations on the Loess Plateau, the effects of climate, land cover and land use pattern on sediment yield as well as the relationship between sediment yield and environmental variables are studied in this paper. The integrated impact by natural variables and human activities and their weights in influencing sediment yield are also quantitatively analyzed on the Loess Plateau, particularly in the sandy and coarse sandy areas. Furthermore, the adaptive coefficient of eco-water requirement of natural vegetation and the concepts of restoration degree of forest and grass are used to systematically discuss the macro-configuration changes of land use pattern and vegetation restoration prospect in the middle Yellow River, particularly in sandy and coarse sandy areas. Studies indicate that on the Loess Plateau, where the growth of vegetation mainly depends on natural precipitation, biological measure (mainly vegetation type) is required to be in accordance with natural zone, and the restoration and construction of macro-vegetation should adhere to the vegetation restoration degree and its adaptive coefficient of eco-water requirement. With the pressure of growing population, it is a key problem to reconstruct vegetation and crop planting to settle out the contradictions, such as properly dealing with the relationship of economic development and environmental protection, reducing reclamation rate and protecting farmland, planting forest and making grass and their adaptative to precipitation as well the reasonable configuration of biological and engineering measures on the Loess Plateau.

**Key words:** the middle Yellow River; sediment yield; degree of vegetation restoration; adaptability of eco-water requirement

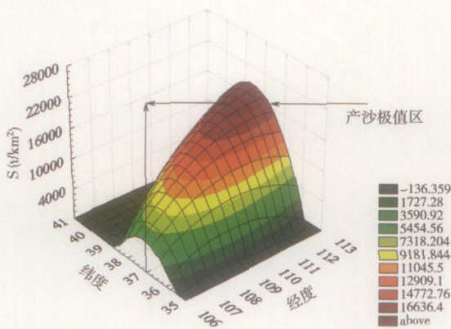


图 2 黄河中游产沙模数(S)的空间分布  
Fig.2 Spatial distribution of sediment  
yield in the middle Yellow River

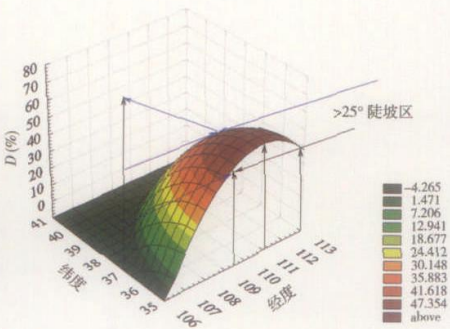


图 3 黄河中游>25°坡地面积(D)的分布  
Fig.3 Distribution of sloping area > 25°(D)

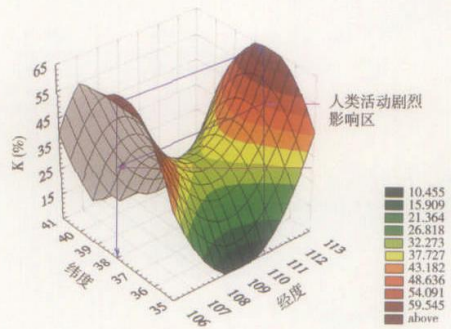


图 4 黄河中游垦殖率(K)的空间分布  
Fig.4 Distribution of reclamation rate (K)  
in the middle Yellow River

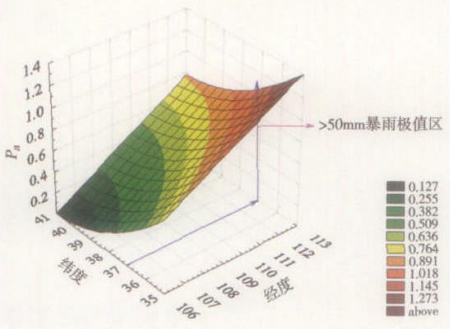


图 5 黄河中游>50mm暴雨次数(Pₐ)的空间分布  
Fig.5 Distribution of the  
rainstorms (Pₐ) days >50 mm

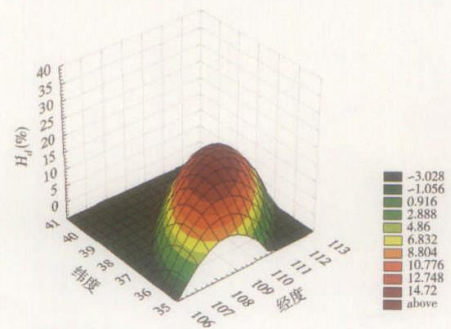


图 6 黄河中游>25°耕地面积(Hₐ)的分布  
Fig.6 Distribution of farmland(Hₐ) >25°  
in the middle Yellow River

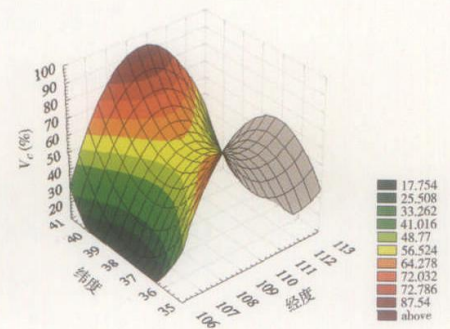


图 7 黄河中游植被恢复度(Vₑ)的空间变化  
Fig.7 Spatial changes of vegetation recovered  
degree(Vₑ)in the middle Yellow River