

降水—植被耦合关系及其 对黄土高原侵蚀的影响

许炯心

(中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要: 降水、植被与侵蚀过程三者之间关系的研究, 是地表过程领域中重要的科学问题, 迄今未能完全解决。通过对黄土高原地区大量实测资料的分析, 揭示了森林覆盖率和降雨侵蚀力随年降水量的非线性变化。发现了森林覆盖率随年降水变化过程中的临界点, 即当年降水量小于 450 mm 时, 森林覆盖率很小且基本上不随年降水而变化; 当年降水大于 450 mm 以后, 森林覆盖率随年降水的增大而急剧增大。同时还发现, 降雨侵蚀力随年降水量的变化过程也存在着两个临界点。当年降水量小于 300 mm 时, 降雨侵蚀力很小且基本上不随年降水而变化; 当年降水量超过 300 mm 时, 降雨侵蚀力随年降水量的增大而迅速增大; 当年降水量大于 530 mm 以后, 降雨侵蚀力随年降水量增大的速率进一步加大。从分析与上述各临界点相联系的植被抗蚀力和降雨侵蚀力的对比关系入手, 解释了黄土高原地区侵蚀强度随年降水变化的非线性图形, 即随年降水的增大, 侵蚀强度先是增大并达到峰值, 然后再减小。并讨论了上述各个临界点对于黄土高原侵蚀治理的应用意义。

关键词: 侵蚀; 植被; 降水; 地貌临界值; 黄土高原

1 引言

降水、植被与侵蚀过程三者之间关系的研究, 是地表过程领域中重要的科学问题, 迄今未能完全解决。这一问题的研究, 既可以在空间中展开, 又可以在时间过程中展开, 并涉及到不同的空间和时间尺度。不同地点的降水特征以及与降水密切相关的植被特征之间, 具有特定的组合关系, 这种组合关系决定了不同地点具有不同的侵蚀产沙特征, 因而使得侵蚀现象在宏观上表现出一定的地域性或者地带性分布。从降水—植被—侵蚀耦合关系入手, 深入地揭示这种地域性或地带性分布的形成机理, 有可能为通过植被恢复来治理水土流失、减少河流泥沙, 提供更为坚实的决策依据。当前黄河流域中正在深入开展以退耕还林(草)为中心的生态环境建设, 迫切需要在这一问题上取得进展。

由于植被作用的存在, 降水和侵蚀产沙之间的关系不是线性的, 而是非线性的、复杂的, 可以用图 1 中所示的框图来表示。某一地点的侵蚀强度, 取决于降雨侵蚀力、暴雨径流侵蚀力与地表抗蚀力之间的对比关系。降雨侵蚀力是降水特性的函数, 暴雨径流侵蚀力也与暴雨特性密切相关。一般而言, 年降水量越大, 暴雨强度越大, 因而降雨侵蚀力与暴雨径流侵蚀力也越大, 二者之间表现为正相关关系。地表抗蚀力可以分解为地表植被抗蚀力和地表物质抗蚀力。前者直接取决于植被状况, 后者则与地表物质的性质(如岩石类型)和粒度组成、土壤的物理化学性质有关。在一定程度上, 因为成土过程与植被作用有关, 故土壤特性与植被之间也具有一定的联系。植被是一种地带性的自然地理要素, 其宏观空间分布格局与年降水量之间有着十分密切的关系。年降水量决定着天

收稿日期: 2005-06-25; 修订日期: 2005-11-20

基金项目: 国家自然科学基金委及水利部联合资助重点项目(50239080); 国家自然科学基金项目(40271019)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.50239080; No.40271019]

作者简介: 许炯心(1948-), 男, 四川绵阳人, 研究员, 博士生导师, 中国地理学会会员。从事河流地貌研究工作。

E-mail: xujx@igsnrr.ac.cn

然植被的类型、生物量积累和植被对地表的覆盖状况。一般而言，年降水量越大，则植被的生物量越大、对地表的保护作用越强，因而由此产生的植被抗蚀力也越强。由此形成了年降水量与地表植被抗蚀力之间的负相关关系。由上述分析可知，由于植被作用的加入，使得年降水与侵蚀强度之间的关系具有不确定性。当年降水量较大时，降雨所产生的侵蚀力也较大，这可能导致较高的侵蚀强度；然而，当多年平均年降水量较大时，与之相联系的天然植被的抗蚀力也较强，这又可能导致较低的侵蚀强度。换言之，如果在某一地点，前一方面即降雨侵蚀力的作用居于主导地位，植被抗蚀力的作用居于次要地位，则年降水和侵蚀强度的关系可表现为正相关；如果在另一地点，后一方面即植被抗蚀力的作用居于主导地位，而降雨侵蚀力的作用居于次要地位，则年降水和侵蚀强度之间的关系可表现为为负相关。因此，从图 1 中所示的简单的概念模式可知，侵蚀产沙与年降水特征之间可能存在着复杂的、非线性的关系。这已为前人的研究所证实。

早在 1958 年，美国学者 Langbein 和 Schumm 就以美国中部和东部若干流域的资料为基础，建立了流域产沙模数与年有效降水量之间的关系。该关系表明，随着有效降水量的增大，产沙模数先是增大，并达到峰值；当降水量进一步增大时，产沙模数则减小^[1]。其后，这一变化图形得到了世界上不同地区研究成果的证实^[2-4]，被称为 Langbein-Schumm 关系。许炯心运用中国近 700 个流域的资料对 Langbein-Schumm 关系进行了验证，揭示了我国侵蚀产沙的地带性规律，认为这一规律可以用 Langbein-Schumm 关系来解释^[5]。他还以黄河若干支流的水文资料和气象资料为基础，建立了产沙模数与年降水量的关系，其变化图形与 Langbein-Schumm 关系类似^[6]。然而，迄今为止，对上述图形形成机理的解释尚有待于深化。本文将在前人工作的基础上，以黄土高原地区的大量实测资料验证图 1 中的概念模式，揭示降水—植被耦合关系对侵蚀产沙的影响，并确定其中的若干临界值，为黄土高原生态环境建设的布局规划和措施配置提出若干建议。

2 研究区概况、方法与资料来源

2.1 研究区概况

本研究所涉及的范围为广义的黄土高原地区(图 2)，包括黄土高原及其以北邻区，除了太行山以西、日月山—贺兰山以东、秦岭以北、长城以南的黄土高原主体以外，还包括长城以北至阴山以南的广大风沙地区^[7]。这一地区位于从干旱气候、半干旱气候向半湿润气候的过渡区。从西北向东南，年降水量变化于 200~700 mm 之间，自然植被类型则由干旱荒漠，经干旱草原、森林草原、草原森林过渡为暖温带落叶阔叶林，地表物质由风成沙、沙黄土向典型黄土和粘黄土过渡。因此，这一地区自然条件的空间变化梯度大，侵蚀强度的空间差异亦大，是研究降水—植被耦合关系对侵蚀产沙影响的理想地区。

2.2 研究方法、定量指标与资料来源

为了定量的揭示降水—植被与侵蚀之间的关系，本文引进了若干定量指标，然后试

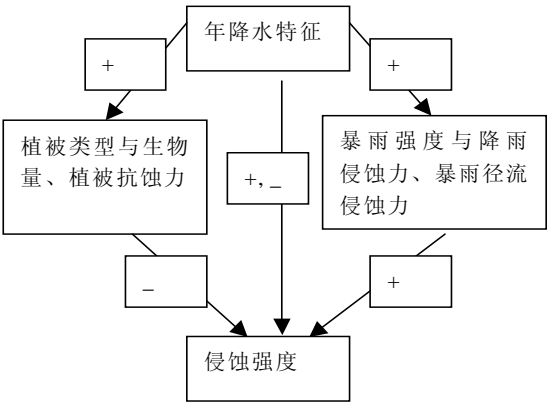


图 1 侵蚀强度与年降水关系示意图
箭头上的正 (+)、负 (-) 号分别表示正相关和负相关
Fig. 1 A flowchart showing relationship between erosion intensity and annual precipitation. The symbols + and - at the arrows indicate positive and negative correlations respectively

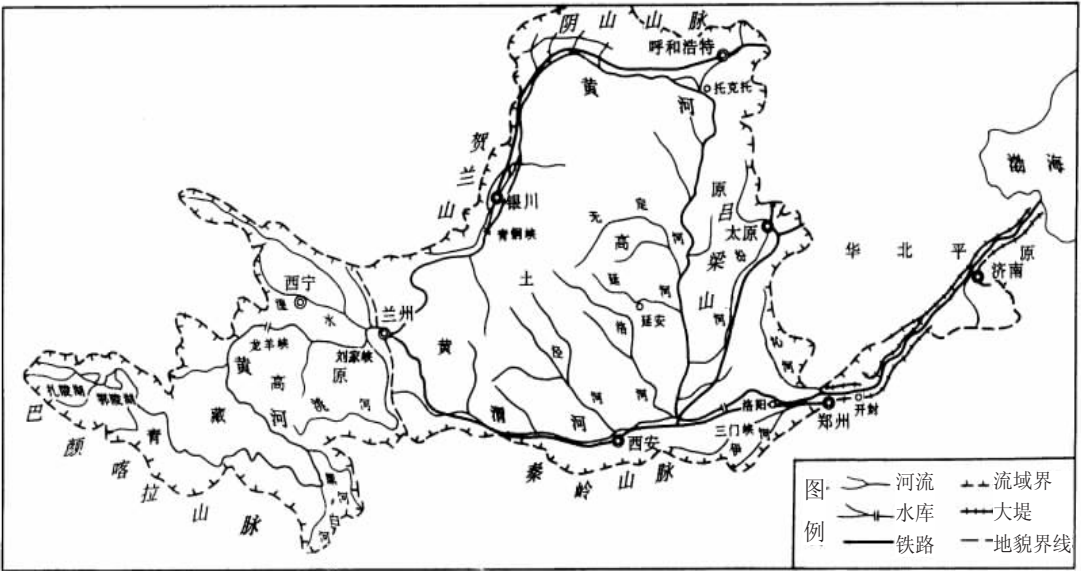


图 2 研究区位置略图
Fig. 2 Location map of the study area

图建立各项指标之间的关系，以便定量描述降水—植被耦合关系对侵蚀产沙的影响。

除了以年降水量来描述降水特征外，我们还采用了降雨侵蚀力作为指标。降雨侵蚀力 R 是按降雨能量 E 和最大 30 min 雨强 I_{30} 来定义的，即 $R = \Sigma (E \cdot I_{30})$ 。由于野外测定 E 有一定的困难，故常按经验公式来计算 R 值^[8]，王万忠等^[9]采用了下列经验公式来表示黄土高原的多年平均降雨侵蚀力：

$$R = 0.015P^{0.107}I_{60}^{0.989}I_{1440}^{1.312} \tag{1}$$

式中： P 为多年平均降水量 (mm)， I_{60} 和 I_{1440} 为多年平均最大 60 min 和 1440 min 降雨量。 R 的单位为 $m.t.cm/(hm^2.h)$ 。他们并以黄土高原地区 164 个水文站 1950~1989 年间的多年平均降雨观测资料，计算了各站的 R 值^[9]。本研究中利用了他们计算的结果。除了利用来自水文站的雨量资料外，还利用了来自黄土高原地区各县气象站的多年平均年降水资料。

为了表示植被特征，我们以森林覆盖率作为指标，表示某一地区林地面积占该地区总土地面积的百分比。该指标可以间接用于表达植被抗蚀力。为了分析问题的方便，我们也用非林地面积百分比来表示地表的可蚀性，它等于 100% 与林地面积百分比之差值。各县森林覆盖率是通过 1985 年的卫星影像估算出来的，见文献[10]。为了分析问题，有时候需要考虑在天然状况即未受到人类活动影响的条件下的植被抗蚀力。此时，我们以潜在生物量即自然植被初级净生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 作为指标，表示由当地自然条件所决定的最大可能的 (即潜在的) 植被生物量的年生产量，以 $t/(ha.a)$ 作为指标。 NPP 的研究，在黄土高原地区已有多家成果，我们在本文中采用了朱志辉的 NPP 计算公式，并利用了他对于黄土高原地区各县的计算结果^[11]。

侵蚀产沙强度的确定有多种方法。除了用水文站实测的输沙模数即某一水文站所控制的流域中单位面积的年产沙量以外，在黄土高原地区一般还采用按县求得的侵蚀模数的资料。本研究采用按县求得的侵蚀模数，是综合运用遥感影像分析、坡面小区定点观测和野外调查相结合的方法估算出来的。遥感影像系 1985 年的 TM 图像，定点观测资料系多年平均值，但资料系列的长短互有出入，一般截止于 1985 年。各县侵蚀模数的资料来源于文献[12]和[13]。虽然精度不是很高，但在反映宏观地域差异方面仍有重要的参考意义。

3 降水—植被耦合关系

运用以上指标，我们分析了植被抗蚀力、降雨侵蚀力随年降水量的变化。以黄土高原 280 余个县的资料为基础，我们在图 3a 中点绘了森林覆盖率与年降水量的关系。从图中可以看到，从整体上说，森林覆盖率 C_f 与年降水量 P_m 之间具有显著的正相关，计算出的相关系数 $r = 0.584$ ，高于显著性水平为 0.01 的临界相关系数 $r_c = 0.148$ 。这证明了图 1 中所指出的植被抗蚀力与年降水量之间负相关关系的存在。同时，从图 3b 中还可以看出， C_f 与 P_m 之间的关系是非线性的。虽然点子较为分散，但大致可以用两条斜率不同的直线来拟合，与转折点相对应的年降水量大致为 450 mm 左右。当 $P_m < 450$ mm 时，拟合直线的斜率很小，意味着 C_f 随 P_m 增加的速率极慢；当 $P_m > 450$ mm 时，拟合直线的斜率很大，意味着 C_f 随着 P_m 增大的速率显著增大。

图 4a 中点绘了 190 余个站点的降雨侵蚀力 R_e 与年降水量 P_m 的关系。虽然点子较分散，但总体上呈正相关。相关系数的计算表明， R_e 与 P_m 之间的相关系数为 $r = 0.77$ ，大大高于显著性水平为 0.01 时的临界相关系数 $r_c = 0.181$ ，说明 R_e 与 P_m 之间具有显著性的正相关，从而证明了图 1 中所指出的降雨侵蚀力与年降水量之间正相关关系的存在。从图中可以看出， R_e 随 P_m 的变化也是非线性的，可以用 3 条斜率不同的直线来拟合。从左至右，3 条直线的斜率依次变大，当 $P_m < 300$ mm 时，斜率很小， R_e 基本上不随 P_m 的增大而增大。当 $P_m > 300$ mm 以后，斜率显著加大，说明 R_e 随 P_m 的增大而迅速增大。当 $P_m > 530$ mm 以后，拟合直线的斜率再度增大，说明 R_e 随 P_m 增大的速率进一步变大。

为了对植被抗蚀力和降雨侵蚀力随年降水的变化进行比较，以便揭示两种变化之间的组合关系，我们在同一坐标系中点绘了 C_f 和 R_e 随 P_m 的变化（图 4b）。为了清楚地看到变化趋势，图 4c 中点

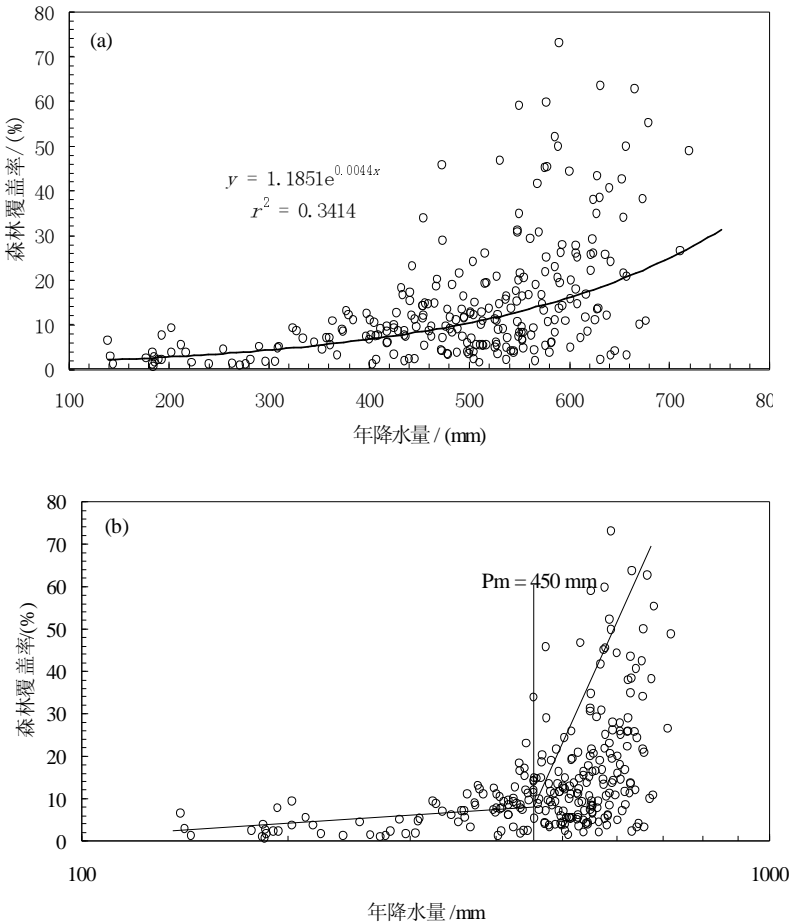


图 3 森林覆盖率与年降水量的关系 (a) 普通坐标 (b) 半对数坐标
Fig. 3 Relationship between forest cover and annual precipitation in ordinary (a) and semi-log coordinates (b)

绘了同样的关系，但略去了具体的数据点。可以看到，对于不同的年降水量，森林覆盖率和降雨侵蚀力 R_e 随年降水量 P_m 的变化率是不同的。当年降水量小于 300 mm 时， C_f 、 R_e 和它们随 P_m 的变化率皆处于低水平。当年降水量在 300~450 mm 之间时， C_f 和 C_f 随 P_m 的变化率仍处在低水平， R_e 却迅速增大。 C_f 随 P_m 迅速增大发生于年降水量大于 450 mm 之后，这一开始点要大大的落后于 R_e 随 P_m 急剧增大的开始点。当 P_m 大于 530 mm 之后， R_e 随 P_m 而增大的速率再度增大，与 C_f 随 P_m 增大的高速率相匹配。

4 降 水—植 被 耦 合 所 决 定 的 侵 蚀 产 沙 随 降 水 的 变 化

图 4c 中所显示的森林覆盖率 C_f 和降雨侵蚀力 R_e 随年降水量 P_m 的变化速率的组合关系，直接控制着侵蚀产沙强度随年降水量的变化图形。以黄土高原地区 64 个县的资料为基础，我们在图 5a 中点绘了年均侵蚀模数与年均降水量的关系。这一关系与 Langbein-Schumm 关系的变化图形是一致的。随着年降水量的增加，侵蚀模数也增加，并在年降水量为 450 mm 处达到峰值。此后，随着年降水量的进一步增加，侵蚀模数减小。与峰值处相对应的年降水量是一个重要的临界值。同时在图上还可以看到另一个临界点，位于年降

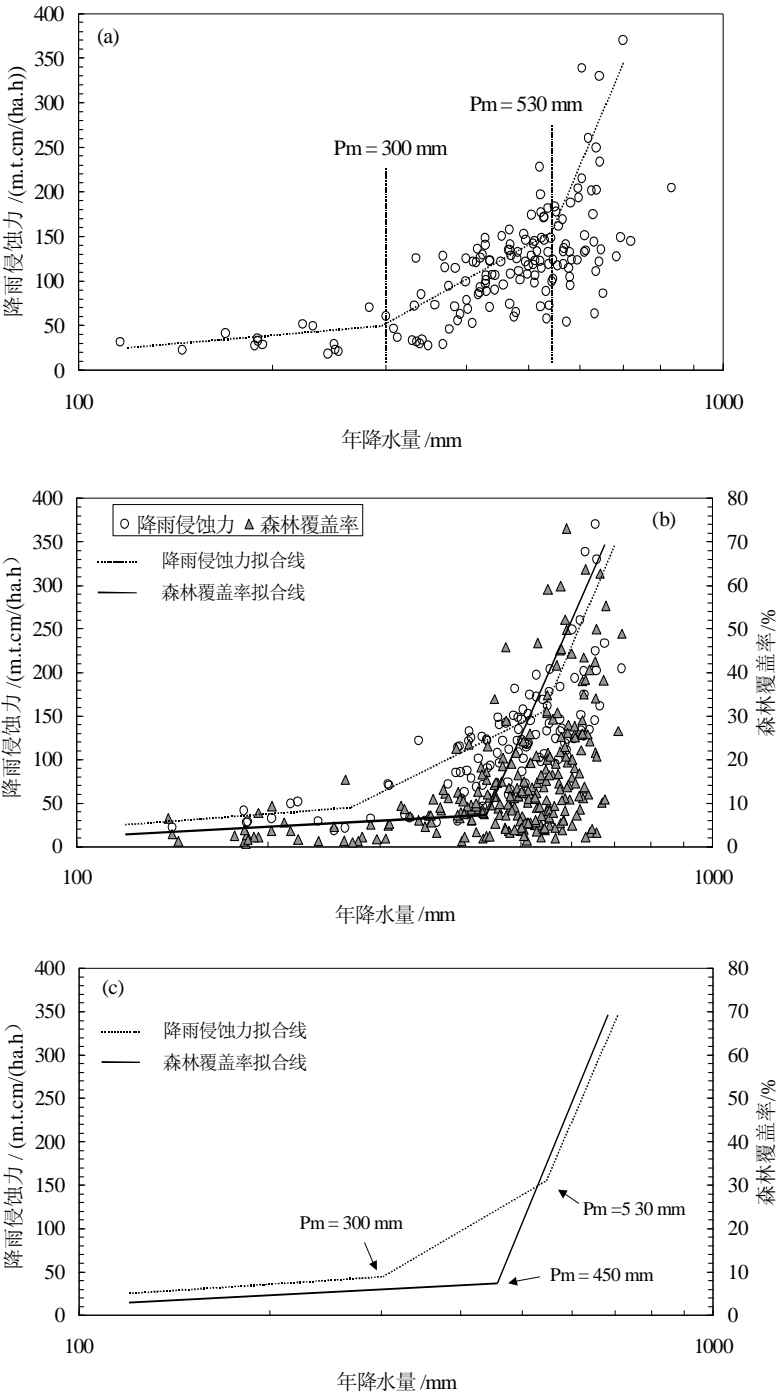


图 4 降雨侵蚀力和森林覆盖率随年降水量的变化
Fig. 4 Relationship between rainfall erosivity and annual precipitation

水量为 300 mm 处。当年降水量小于 300 mm 时，拟合曲线的斜率很小，意味着侵蚀模数随年降水量而增大的速率很慢。然而，当年降水量超过 300 mm 以后，曲线的斜率突然变大，表明侵蚀模数随年降水的增大而急剧增大。将图 5a 与图 4c 相比较，可以阐明降水—植被耦合关系影响侵蚀强度—年降水量关系变化图形的内在机理。

图 4b、图 4c 中所示的降雨侵蚀力—年降水量关系中，在 $P_m = 300$ 处也出现了一个拐点，这与图 5a 中拐点的位置是相同的。从图 3b 和图 4c 中所示的森林覆盖率—年降水量的关系图中可以看到，拐点出现于 $P_m = 450$ mm 处，小于此值时，森林覆盖率很低，且基本上不随年降水量而变化；大于此值以后，森林覆盖率随年降水量的增大而迅速增大。由此可以得到如下认识：

(1) 当年降水量小于 300 mm 时，以森林覆盖率表示的植被抗蚀力很低，但降水侵蚀力也很低，不足以对裸露地表产生显著的侵蚀，故侵蚀模数很小。

(2) 当年降水量超过 300 mm 但小于 450 mm 时，从图 4c 中可以到，植被抗蚀力仍保持在低水平上，但降雨侵蚀力却急剧增大。这表明，在这一范围内，降雨侵蚀力的作用大于植被抗蚀力，侵蚀过程主要由降雨侵蚀力所控制，故随着年降水量的增大，侵蚀强度急剧增大，这一变化在图 5a 中表现得十分清楚。

(3) 当年降水量超过 450 mm 之后，森林覆盖率越过了临界点，开始迅速增大，植被抗蚀力在侵蚀过程中所起的作用显著增强。这使得植被的控制作用逐渐接近并最终超过降雨侵蚀力的作用，取代后者而居于主导地位。当植被的主导作用开始出现后，侵蚀强度随降水增加而变化的方向发生改变，即由增加变为减小，这一变化对应于图 5a 中侵蚀模数的峰值。

(4) 从图 4c 中可以看到，降雨侵蚀力—年降水关系在 $P_m = 530$ mm 再度出现一个拐点，超过此值后，降雨侵蚀力随年降水的增速进一步增大。从同一图中可以看到，此时森林覆盖度已经相当高，植被抗蚀力与降雨侵蚀力相比仍然处于主导地位，故侵蚀模数仍呈减小的趋势。

图 5b 中点绘了侵蚀模数与植被覆盖度之间的关

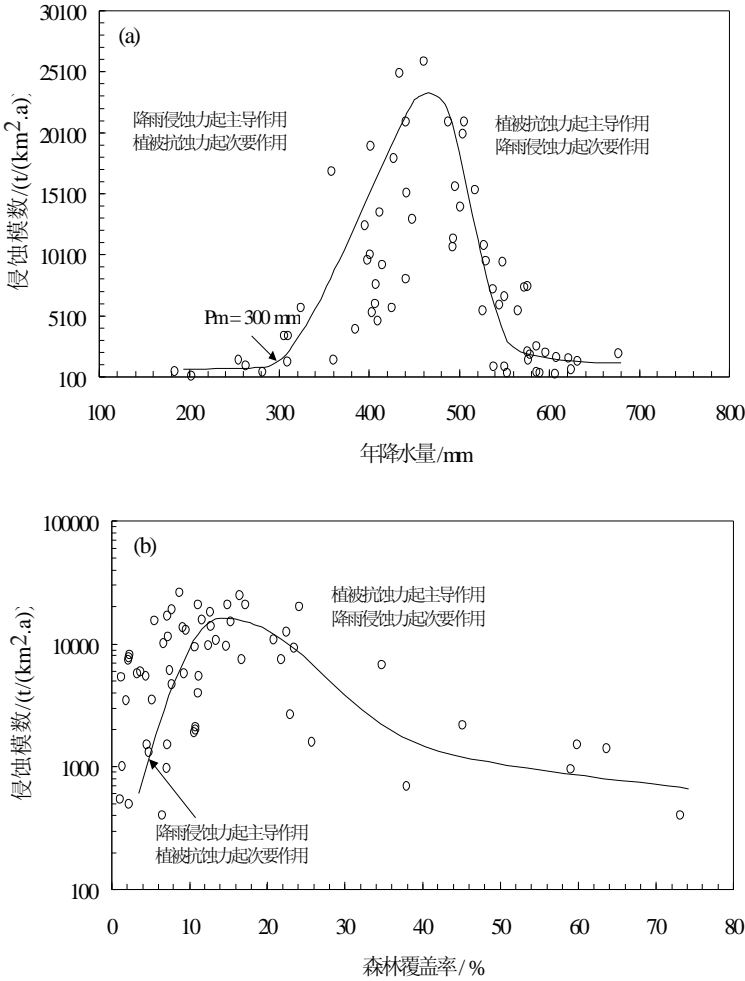


图 5 侵蚀模数与年均降水量 (a) 和森林覆盖率 (b) 的关系
Fig. 5 Plots of erosion intensity against annual precipitation (a) and forest cover (b)

系。该图表明随着森林覆盖率的增大，侵蚀模数先是增大，达到峰值后再减小。在峰值的左侧，较低的森林覆盖度与较小的年降水量有关，在侵蚀过程中植被抗蚀力起次要作用，降雨侵蚀力起主导作用，故图中峰值左侧的正相关所反映的实质是降雨侵蚀力与侵蚀模数的关系，而不仅仅是植被抗蚀力与侵蚀的关系。峰值右侧，较高的森林覆盖度由较大的年降水量所决定，在侵蚀过程中植被抗蚀力起主导作用，降雨侵蚀力起次要作用，故随着森林覆盖率的增大，侵蚀模数减小。应该指出的是，从图中可见，与侵蚀模数的峰值相对应的森林覆盖率为 15%~20%，是大大偏低的，因为这样的植被状况不足以有效地控制侵蚀。由于目前黄土高原的森林覆盖率在绝对数值上，并不反映天然状况，因为大多数林地均是人类破坏后剩余的或是人工次生林。然而，图 5b 中的图形在定性上仍是有意义的。

5 对 Langbein-Schumm 关系的解释

Langbein-Schumm 关系是 1958 年提出的^[4]。Langbein 和 Schumm 从定性的角度分析了有效降水量与植被的关系以及由降水决定的侵蚀作用与植被对地表保护作用的对比关系，以此对这一关系的机理进行了定性解释。依据黄土高原地区的资料，我们可以对侵蚀强度和年降雨之间非线性关系的内在机理做进一步探讨。

如前所述，侵蚀强度既取决于降雨侵蚀力，又取决于地表抗蚀力。地表抗蚀力与地表可蚀性在本质上是共同的，地表抗蚀力越强，则可蚀性越低。故可以用森林覆盖率的倒数来表示可蚀性，其意义是与单位面积的森林所对应的总土地面积，其值越大，则裸露地面积越大。如果不考虑人类活动的影响，可以用潜在生物量即植被第一性生产力 NPP 来表示可能的植被状况，其倒数 1/NPP 表示与单位 NPP 相对应的土地面积，此值越高则天然植被越稀疏，地表可蚀性越强。引入地表可蚀性的指标以后，我们在图 6a 和图 6b 中分别点绘了决定侵蚀过程的两个指标即降雨侵蚀力和植被决定的地表可蚀性随年降水量的变化。图 6a 中点子比较分散，但仍可看到，降雨侵蚀力 R_e 与年降水量呈正相关，森林覆盖率的倒数 $1/C_f$ 与年降水呈负相关。在图形的左侧，当年降水量很小时，地表可蚀性 $1/C_f$ 很大，但降雨侵蚀力 R 很小，故侵蚀强度不会很大；在图形的右侧，降雨侵蚀力 R 很大，但地表可蚀性 $1/C_f$ 很小，显然都不会使侵蚀强度取得最大值。只有当年降水量为中等时，降雨侵蚀力和地表可蚀性均较大，才会出现侵蚀强度的最大值。图 6b 中的变化图形与图 6a 在本质上是一致的，也可以得到同样的结论。因此，通过图 6 可以对 Langbein-Schumm 关系的内在机理作出解释。

6 结论与讨论

通过对黄土高原地区大量实测资料的分析，本文揭示了森林覆盖率和降雨侵蚀力随年降水量的非线性变化。发现了森林覆盖率随年降水变化过程中的临界点，即当年降水小于 450 mm 时，森林覆盖率很小且基本上不随年降水而变化；当年降水大于 450 mm 以后，森林覆盖率随年降水的增大而急剧增大。同时还发现，降雨侵蚀力随年降水量的变化过程也存在着两个临界点。当年降水量小于 300 mm 时，降雨侵蚀力很小且基本上不随年降水而变化；当年降水量超过 300 mm 时，降雨侵蚀力随年降水量的增大而迅速增大；当年降水量大于 530 mm 以后，降雨侵蚀力随年降水量增大的速率进一步加大。从分析与上述各临界点相联系的植被抗蚀力和降雨侵蚀力的对比关系入手，解释了黄土高原地区侵蚀强度随年降水变化的非线性图形，即随年降水的增大，侵蚀强度先是增大并达到峰值，然后再减小。

上述各个临界点的发现,对于黄土高原的侵蚀治理有一定的应用意义。年降水量大于 450 mm 以后森林覆盖率才迅速增大,这是与植被的地带性变化相联系的,说明黄土高原地区在年降水量为 450 mm 以下,不能形成森林植被,除非具有局部的有利条件。这启示我们,在以水土流失治理为目标的植被建设中,应当将此作为人工植被布局的参考界限。即在年降水量为 450 mm 以下的地区,不宜大面积的营造乔木植被。同时,本文研究还表明,在年降水量为 450 mm 以下的地区,降雨侵蚀力在侵蚀过程中居于主导地位,植被抗蚀力居于次要地位,侵蚀强度变化趋势主要由前者所决定。因此,在这样的地区,侵蚀治理不应该以造林和植被措施作为侵蚀治理的主要手段,而应该以工程措施如梯田、淤地坝修建等为主,植被措施也应该以种植灌木和恢复草被为主。在年降水量大于 450 mm 的地区,植被因素是控制侵蚀过程的主导因素,因此可以将植被措施作为侵蚀治理的主要手段,但仍必须与梯田、淤地坝等工程措施相结合,以便更有效地控制进入黄河的泥沙量。这是因为沟谷侵蚀是黄土高原地区对入黄泥沙贡献率最大的侵蚀类型^[13],通过植被措施,目前还不足以有效地控制沟谷侵蚀。

参考文献 (References)

[1] Langbein L B, Schumm S A. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. Transactions, American Geophysical Union, 1958, 39: 1076-1084.

[2] Douglas I. Man, vegetation and sediment yield of river. Nature, 1967, 215: 925-928.

[3] Walling D E, Webb B W. Patterns and sediment yield. In: Gregory K J (ed.), Background to Palaeohydrology. Chichester: Wiley, 1983. 69-100.

[4] Wilson L. Variations in mean annual sediment yield as a function of mean annual precipitation. American Journal of Science, 273: 335-349.

[5] Xu Jiongxin. Zonal distribution of river basin erosion and sediment yield in China. Chinese Science Bulletin, 1994, 39 (16): 1356-1361. [许炯心. 我国流域侵蚀产沙的地带性特征. 科学通报, 1994, 39(11): 1019-1022.]

[6] Xu Jiongxin. The wind-water two-phase erosion and sediment producing processes in the middle Yellow River Basin.

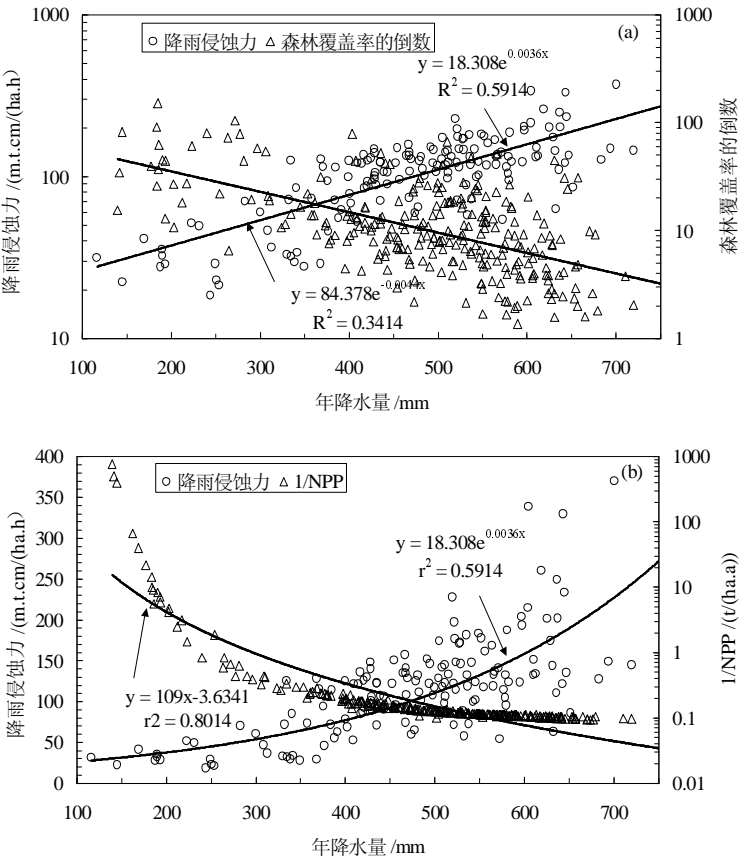


图 6 降雨侵蚀力和植被决定的地表可蚀性随年降水量的变化
(a) 降雨侵蚀力和森林覆盖率的倒数随年降水量的变化
(b) 降雨侵蚀力和 NPP 的倒数随年降水量的变化

Fig. 6 Rainfall erosivity and vegetation-determined erosional resistance varying with annual precipitation
(a) Rainfall erosivity and $1/C_f$ varying with precipitation
(b) Rainfall erosivity and $1/NPP$ varying with precipitation

- Science in China, 2000, 43(2): 176-186. [许炯心. 黄河中游多沙粗沙区的风水两相侵蚀产沙过程. 中国科学(D 辑), 2000, 30(5): 540-548.]
- [7] Yang Qinye, Yuan Baoyin (eds.). Natural Environment of Loess Plateau and Its Evolution. Beijing: Science Press, 1991. [杨勤业, 袁宝印 主编. 黄土高原地区的自然环境及其演变. 北京: 科学出版社, 1991.]
- [8] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. Agricultural Handbook No.537. Washington D.C.: US Department of Agriculture, 1978.
- [9] Wang Wanzhong, Jiao Juying, Hao Xiaopin. Data for Rainfall-induced Erosion and Sediment in Loess Plateau. Xi'an: Xi'an Cartographic Publishing House, 1998. 130-134. [王万忠, 焦菊英, 郝小品. 黄土高原降雨侵蚀产沙数据图集. 西安: 西安地图出版社, 1998. 130-134.]
- [10] Wang Naibin, Shen Hongquan, Zhao Cunxing et al. (eds.). Data on Natural Resources and Environment of Loess Plateau by Remote-Sensing. Xi'an: Xi'an Cartographic Publishing House, 1991. 147-158. [王乃斌, 沈洪全, 赵存兴 等 主编. 黄土高原地区资源与环境遥感调查数据集. 西安: 西安地图出版社, 1991. 147-158.]
- [11] Zhu Zhihui. A model for estimating net primary productivity of natural vegetation. Chinese Science Bulletin, 1993, 38 (22): 1913-1917.
- [12] Team for Integrated Scientific Investigation on the Loess Plateau, CAS. Data on Environment, Natural Resources and Socio-Economy in the Loess Plateau Region. Beijing: China Economic Publishing House, 1992. 1-575. [中国科学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. 1-575.]
- [13] Tang Keli (ed.). Soil Erosion in the Loess Plateau Region and Its Control. Beijing: China Science and Technology Press, 1990. 1-246. [唐克丽 主编. 黄土高原地区土壤侵蚀区域特征及其防治途径. 北京: 中国科学技术出版社, 1990. 1-246.]

Coupling Relationship between Precipitation and Vegetation and the Implications in Erosion on the Loess Plateau, China

XU Jiongxin

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS;
Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: The relationship among precipitation, vegetation and erosion is an important, unsolved issue in the field of earth surface processes. Based on data from the Loess Plateau of China, some nonlinear relationships between forest cover (C_f), rainfall erosivity (I_r) and annual precipitation (P_m) has been found. A threshold has been identified at $P_m = 450$ mm, that is, when P_m is smaller than 450 mm, C_f is low and basically does not vary with P_m ; when P_m exceeds 450 mm, C_f increases rapidly. Furthermore, two thresholds are identified in the relationship between rainfall erosivity and annual precipitation. When P_m is smaller than 300 mm, I_r is low and basically does not vary with P_m . When P_m exceeds 300 mm, I_r increases rapidly; when P_m becomes larger than 530 mm, the rate at which I_r increases with P_m becomes higher. Based on these nonlinear relationships, the nonlinear picture of variation between erosion intensity and annual precipitation, i.e., the erosion intensity increases with annual precipitation to a peak and then declines, is explained. The implication of these thresholds for erosion control on the Loess Plateau is discussed.

Key words: erosion; vegetation; precipitation; geomorphic threshold; Loess Plateau of China