

植被因素对无定河流域沙尘暴的影响及其 侵蚀产沙意义*

许炯心^{1**} 信忠保^{1,2}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地水循环与地表过程重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 运用基于遥感方法提取的植被指标 NDVI 资料、水土保持面积的统计资料、从气象站获取的沙尘暴频率资料以及从水文站获取的悬沙粒度资料, 研究了植被因素对无定河流域沙尘暴频率和悬移质泥沙粒径的影响。全流域年平均 NDVI 的变化在总体上表现出增大的趋势, 流域内毛乌素风沙区 NDVI 的增大更为显著。历年累积的造林和种草面积也表现出显著的增大趋势。植被覆盖状况的改善, 特别是作为本区沙尘暴主要物源区的毛乌素沙地植被覆盖状况的改善, 导致了沙尘暴发生频率的减小。沙尘暴的减少使得进入河道的风成沙数量减少, 进入河道的风成沙数量减少导致了悬沙粒度变细。建立了无定河悬沙中值粒径与沙尘暴频率 D_{ss} 、全流域汛期(6—9月)面平均雨量 P_{6-9} 、全流域平均 NDVI 和全流域林草面积 A_{fg} 等 4 个影响变量之间的多元回归方程, 并对各个影响变量变化对悬沙粒变化的贡献率进行了估算。按照贡献率的大小, 各个影响变量的顺序如下: (1) 林草面积; (2) 沙尘暴频率; (3) NDVI; (4) 汛期降水量。

关键词 植被 NDVI 指标 沙尘暴 水土保持 悬移质泥沙 无定河 黄土高原

黄河中游存在着一个风力—水力交互作用区, 或称为风沙黄土转换带, 其中盛行风力水量两相作用, 为侵蚀产沙提供了重要的动力机制^[1]。风力作用表现为沙尘暴的侵蚀与搬运作用, 而沙尘暴的时间变化直接影响侵蚀产沙过程, 特别是粗泥沙的产出过程, 因为风成沙的粒度要比黄土粗得多, 是该地区河流输送的粗泥沙的来源之一^[1]。前人对黄河多沙粗沙区的侵蚀产沙过程和水沙变化进行了大量研究, 包括由于降水和水土保持措施引起的水沙变化^[2-9]。对于风水两相侵蚀产沙作用也进行过研究, 揭示了不同流域的沙尘暴频率与产沙模数的关系^[10]。同时, 还对相关地区的沙尘暴成因进行过研究^[11-13]。然而, 对于这一地区沙尘暴随时间的变化及其对河流侵蚀产沙的影响所作的研究尚少。本文

以黄河中游风沙黄土过渡区的典型流域无定河流域为例, 研究植被因素的变化及其对无定河流域沙尘暴和侵蚀产沙的影响。

1 研究区概况

无定河是黄河中游的重要支流(图 1), 流域面积为 30261 km^2 , 流域出口控制站为白家川水文站, 控制流域面积 29662 km^2 , 流域位于毛乌素沙漠南缘及黄土高原北部地区, 属于典型的风沙黄土过渡带和风力水力交替作用带, 水力作用和风力作用均较强, 风水两相侵蚀产沙作用对于流域的产沙过程特别是粗泥沙的产沙过程起着十分重要的作用。流域降水量平均为 409.1 mm , 由北向南增加, 北部为 370 mm , 南部增为 410 mm , 属于暖温带半干旱气

2007-02-05 收稿, 2007-06-07 收修改稿

* 中国科学院地理科学与资源研究所知识创新工程领域前沿项目(CXIOG-A04-08)和国家自然科学基金(批准号: 40671019)资助项目

** E-mail: xujx@igsnrr.ac.cn

候。年平均大风日数由西北部的 30 天以上, 向东南减少为 10 天左右, 年平均沙尘暴日数则由西北部的 20 天以上, 向东南减少为 5 天左右。位于西北部的风沙区占全流域总面积的 54.3%^[14], 侵蚀模数较低。西部河源地区有厚层黄土覆盖, 形成梁峁丘陵地形, 梁长峁大, 但沟谷密度小。东南部为黄土丘陵沟壑区, 沟谷密度很大, 达 $4-8 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$, 黄土层厚度为 50—100 m, 土壤侵蚀剧烈, 面蚀、沟蚀和重力侵蚀均十分发育^[14]。据水土流失治理以前 1956—1969 年的资料统计, 无定河白家川水文站年输沙量为 209.85 Mt, 居河口镇至龙门间诸支流之首。无定河流域面积只占三门峡以上黄河流域面积的 4.13%, 年径流量仅占 3.46%, 但年输沙量却占到 19.34%, 其中大于 0.05 mm 粗泥沙的数量更占到 25%。

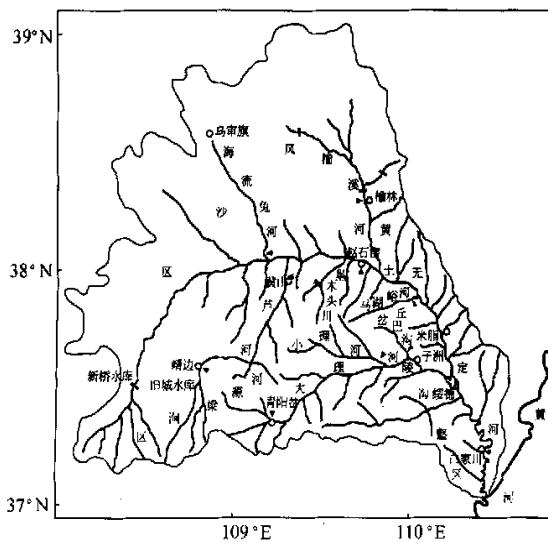


图 1 无定河流域示意图

从 20 世纪 60 年代开始, 国家在无定河流域中展开了水土流失治理工作, 治理规模逐步扩大。截至 1996 年, 全流域累计修建梯田 96.6 km^2 , 造林 485 km^2 , 种草 188.4 km^2 , 淤成坝地 22.5 km^2 。累计治理面积 8364 km^2 , 占全流域水土流失面积的 $36.4\%^{[14]}$ 。

2 资料来源

以年均沙尘暴日数来表示风力作用的强度及其

后果, 资料来自流域内的各县气象站, 涉及子洲、绥德、横山、靖边、榆林等 5 个县的气象站, 以 5 站的平均值代表全流域的沙尘暴频率. 降水资料来自流域内的 90 余个雨量站. 无定河的悬沙粒度资料来自出口控制站白家川水文站, 以中值粒径作为代表粒径.

为了研究植被特征对沙尘暴的影响, 我们利用了遥感资料。遥感技术的发展提供了从多时相、多波段遥感信息提取地表植被状况的强有力手段。NOAA 卫星的传感器观测范围宽, 对地观测重复性好, 使得大范围地表植被的监测成为可能。基于上述遥感资料的归一化植被指数(normal difference vegetation index, NDVI)是目前广泛应用的表征植被状况的指标, 它是遥感影像的近红外波段(Infrared)和红外波段(Red)的比值参数^[15], 计算公式是 $NDVI = (Infrared - Red) / (Infrared + Red)$, 该指标可以很好的反映地表植被的繁茂程度, 与生物量、叶面积指数有比较好的相关关系^[16, 17]。本文使用的 NDVI 数据来自美国航空航天局(NASA)全球监测与模型研究组(global inventor modeling and mapping studies, GIMMS)发布的 GIMMS/NDVI 最大值半月合成数据^[18-20], 时间为 1982—2003 年。对于该数据作了如下几个方面的校正^[21, 22]: (i) 校正了由火山喷发造成同温层气溶胶的影响; (ii) 对北半球冬季由于最大太阳高度角导致的数据缺失进行插补; (iii) 交叉辐射定标; (iv) 通过云监测, 消除了云遮盖; (v) 卫星漂移; (vi) 消除了亚相元云和水汽影响。按照研究区内各县的县界, 提取了各县的 NDVI 数据。为了全面反映植被特征, 采用了全年平均的 NDVI 数值, 没有对于不同月份加以区分。

为了研究水土保持措施对沙尘暴及侵蚀产沙的影响，我们收集了无定河流域历年造林、种草面积的资料。陕西省水土保持局对无定河流域中历年各项水土保持措施进行了统计，并以野外实地抽样调查和利用航空照片、彩红外卫星照片等遥感资料，进行了核查^[14]，本研究中利用了这些数据。

3 结果与解释

3.1 植被覆盖的变化

我们用基于遥感资料的归一化植被指数 NDVI

来表示地表植被的覆盖状况。图2(a)中点绘了全流域年平均NDVI随时间的变化。可以看到,年际间NDVI有很大的波动,但总体上表现出增大的趋势,相关系数在0.05的水平上是显著的。前已述及,无定河流域在地貌上可以分为两大类型,北部和西部为风沙区,属于毛乌素沙地;东南部为黄土区,属于黄土高原丘陵沟壑区。对这两大单元的植被覆盖特性分别进行了研究,结果表明存在着明显的差异。图2(b)中点绘了属于风沙区的5个县的NDVI随时间的变化,图2(c)中则点绘了属于黄土丘陵沟壑区的4个县的NDVI随时间的变化,并给出了各县的NDVI与时间之间的相关系数。从图中

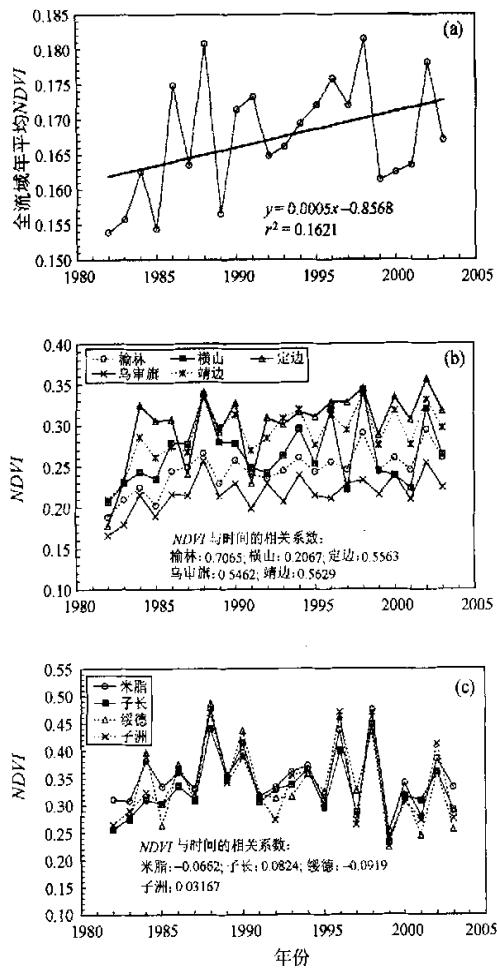


图2 NDVI随时间的变化

(a) 无定河流域; (b) 风沙区的5个县;
(c) 黄土丘陵沟壑区的4个县

可以看到,风沙区的NDVI与时间的相关系数均为正,除了横山较低外,其余各县的相关系数均在0.01的水平上是显著的。与此相反,黄土丘陵沟壑区的NDVI与时间的相关系数很小,不具有随时间而增大的趋势。经仔细观察后发现,从1982年到1990年有增大趋势,此后则略呈减小趋势。

本区植被覆盖度的变化与水土保持措施的实施和1998年以来的退耕还林还草有密切的关系。图3(a)中点绘了历年累积的造林和种草面积随时间的变化,表现出显著的增大趋势。图3(b)中点绘了历年累积的造林种草面积与NDVI指标的关系,表现出明显的正相关,相关系数在0.01的水平上是显著的。这说明,大面积水土保持的实施,特别是种树种草,使本区的植被状况有较大的改善,特别是在风沙区是如此。值得注意的是,丘陵沟壑区的植被覆盖近年来有所下降,这对进一步控制侵蚀产沙是不利的。但由于本区内的黄土区不是本区沙尘暴的主要物质来源区,故可以认为,黄土区近年来植被覆盖的下降对区内沙尘暴的变化影响不大。

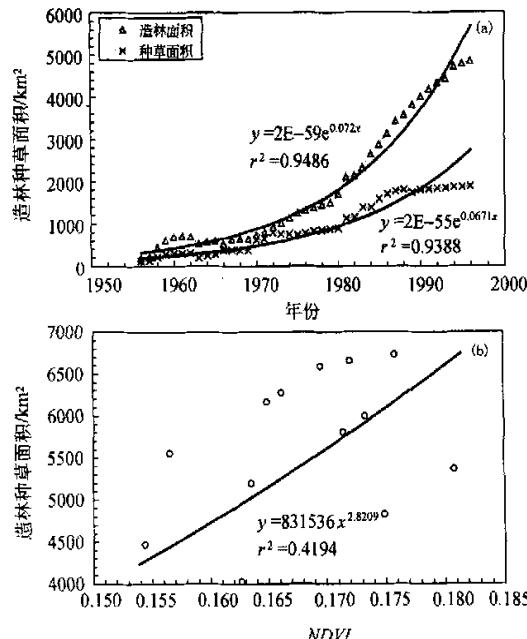


图3 造林种草面积随时间的变化(a)及造林种草面积与NDVI的关系(b)

降水量的变化也会导致植被状况的变化, 降水的增多有利于植被条件的改善, 而降水的减少可能使植被覆盖度下降。本区的年降水量略呈减少的趋势(图4(a)), 可见, 风沙区植被状况的显著改善与降水的变化无关, 主要是人类恢复植被的结果; 而丘陵沟壑区近年来植被指标NDVI的减小, 除与人类活动有关外, 也可能与降水的减少有一定的关系。

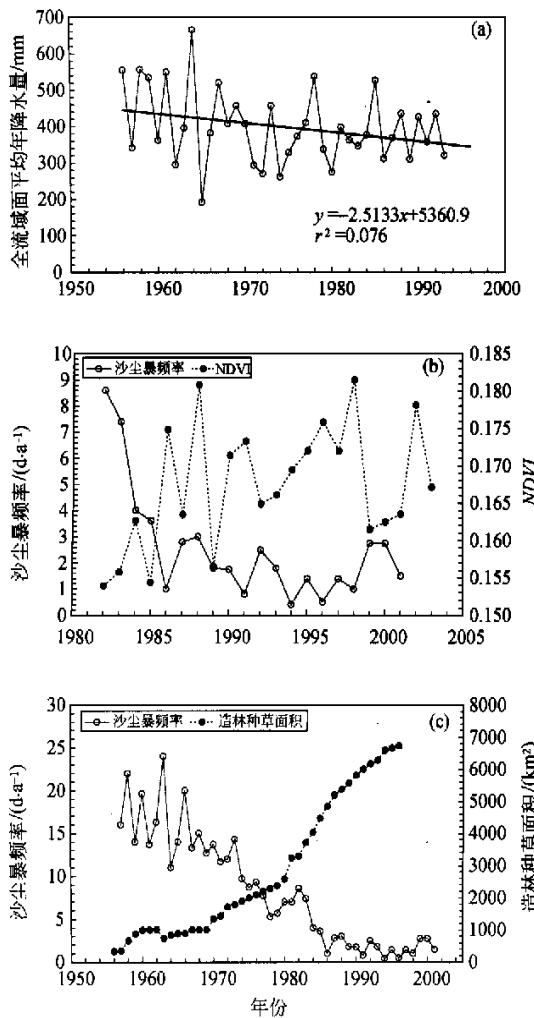


图4 无定河流域年降水量、NDVI、沙尘暴和造林种草面积的变化

(a) 流域面平均年降水量的变化; (b) 沙尘暴发生频率与NDVI指标的变化; (c) 沙尘暴发生频率与造林种草面积的变化

3.2 沙尘暴频率的变化及其与植被因素的关系

大风是形成沙尘暴的动力, 在风力作用下地表

物质的分离和吹扬, 是形成沙尘暴的必要条件。在存在大风的情况下, 沙尘暴的强度和频率, 取决于地面的状况, 即地表物质组成和地表植被覆盖状况。较好的植被覆盖可以有效地削弱风力, 减小近地面的风速, 因而增加地表的抗风蚀能力, 从而减小沙尘暴的发生频率。我们对黄土高原地区227个县的年均沙尘暴日数与大风日数的关系进行了分析^[12], 二者之间相关系数的平方仅为 $r^2=0.1565$, 并不很高, 说明地表物质和地表植被覆盖状况起着重要作用。

植被覆盖状况的改善, 特别是作为本区沙尘暴主要物源区的毛乌素沙地植被覆盖状况的改善, 会导致风力侵蚀的减弱, 因而沙尘暴的发生频率也会随之减小。图4(b)中比较了无定河流1982年以来历年沙尘暴频率与流域平均NDVI指标的变化, NDVI呈增大趋势而沙尘暴频率成减小趋势, 证明了这一点。图4(c)中将1956年以来的沙尘暴发生频率和造林种草面积随时间的变化点绘在同一坐标中。图中沙尘暴频率(D_{ss})随时间(T)的变化可以用下式来表达:

$$D_{ss} = -0.4558T + 910.34 \quad (r^2 = 0.8406) \quad (1)$$

随时间而减小的趋势极为明显。

为了进一步揭示植被因素的变化对无定河流域沙尘暴频率变化的影响, 在图5(a)中点绘了沙尘暴发生频率与NDVI指标的关系, 在图5(b)中则点绘了沙尘暴发生频率与造林种草面积的关系。两者都显示出显著的正相关, 图中已分别给出了回归方程。

3.3 沙尘暴频率变化对侵蚀产沙的影响

许炯心研究发现^[1], 在包括无定河流域在内的黄河中游多沙粗沙区的若干支流中, 造成风力侵蚀和流水侵蚀的外营力在季节分配上是相异的, 因而形成了风水两相侵蚀产沙作用。在冬季和春季, 风力将风沙区的风成沙或一部分基岩风化物, 搬运到坡面、沟道和河流的滩地上, 其中一部分可以直接进入河道中。夏季的暴雨径流使黄土区受到侵蚀, 形成了含有大量细泥沙的浑水并汇入沟道和河道, 进而使前期存贮在那里的粗颗粒泥沙悬浮而被搬运, 形成输送能力极强的高含沙洪水, 使粗泥沙的

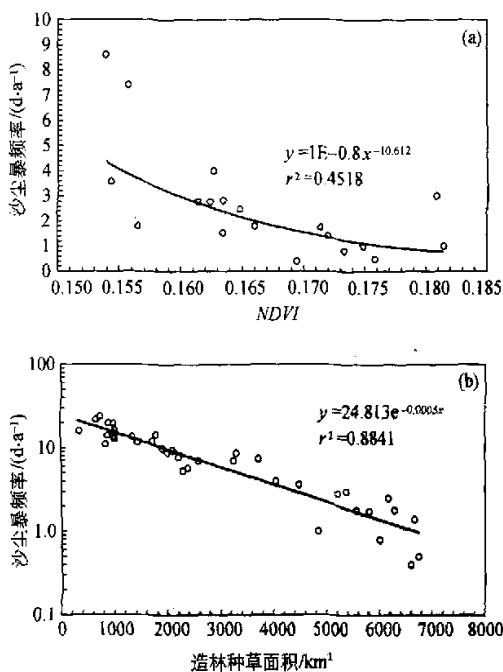


图5 沙尘暴发生频率与NDVI及与造林种草面积的关系

- (a) 沙尘暴发生频率与NDVI指标的关系;
 (b) 沙尘暴发生频率与造林种草面积的关系

产沙模数达到很高的量级^[1]。从卫星像片和航空照片上的观察和野外调查均表明, 无定河流域风沙区的东南边界线主要为河道, 如芦河口至榆溪河口的无定河干流河道以及芦河、榆溪河中下游河道(见图1)。风成沙分布在这些河道的北岸、西岸和西北岸, 无法越过河道。野外实际调查也观察到与盛行风来向一致的一岸的谷坡上有风沙堆积, 而对岸则无风沙, 说明这些河道作为天然“屏障”, 对风成沙有“拦截”的作用。中国科学院沙漠研究所曾对于无定河风成沙的入河量进行过推算^[6]。他们在典型土地利用条件下, 通过野外试验得出了风速与单宽输沙量之间的经验公式, 然后按实测风力与风向的时程变化和不同河段的土地覆盖、土地利用类型以及河段的走向与风向的夹角, 对于风沙入河量进行了计算。结果表明, 无定河风沙入河量每年为24.57 Mt, 相当于这些河流年平均悬移质输沙量的11%^[7]。按1956—1990年平均, 白家川站>0.05 mm粗泥沙的年输沙量为41.69 Mt。据杨根

生等对黄土高原北部风沙区地表物质采样粒度分析, 在风成沙中, >0.05 mm的百分比极高, 平均为99.2%, 几乎为100%^[23]。故可以计算出, 无定河风沙入河量可以占到白家川站>0.05 mm粗泥沙的年输沙量的61.1%。因此, 如果风力侵蚀作用发生变化, 无定河的粗泥沙的产沙量和悬移质泥沙的粒度也会发生变化。

无定河流域沙尘暴发生在水蚀风蚀交错区, 林草植被不仅减弱了冬春的风蚀, 相应也减少了直接入河的粗泥沙。而吹扬式风蚀、跳跃滚动式风蚀, 虽然引致直接进入河道的粗泥沙为量甚少, 但因风力作用而堆积在河岸上的风成沙, 在汛期会由于河岸侵蚀而坍塌到河道中, 进而被来自黄土区的、富含细颗粒泥沙的暴雨洪水所搬运, 形成高含沙水流。因此, 此种风蚀模式的主要作用是为夏秋水力侵蚀导致粗颗粒泥沙入河准备物质条件。植被改善以后, 上述不同的风蚀模式对粗泥沙供应量均会减少。

前已述及, 本区植被状况的改善导致了沙尘暴频率的降低, 这意味着在风水两相侵蚀产沙过程中, 风力的实际作用减弱了。沙尘暴的减弱, 使得在风力作用下进入沟道、河道和河漫滩的风沙减少。由于风沙的粒径要比黄土粗得多, 上述变化将使无定河粗泥沙的产量减少, 悬沙粒度也会变细。为了进行比较, 图6(a)中点绘了白家川站历年的年平均悬沙中值粒径和无定河全流域年平均NDVI随时间的变化, 图6(b)点绘了白家川站历年的年平均悬沙中值粒径和无定河全流域沙尘暴频率随时间的变化, 图6(c)则点绘了白家川站历年的年平均悬沙中值粒径和无定河全流域林草面积随时间的变化。图6(a)显示, 悬沙中值粒径和NDVI随时间的变化在位相上具有相异性, NDVI减小则悬沙中值粒径增大, 大多数次一级的波动均能很好地对应。图6(b)显示, 悬沙中值粒径沙尘暴频率随时间的变化具有一定的同步性, 特别是1965年以后更是如此。图6(c)显示, 从20世纪60年代中期开始, 悬沙中值粒径和造林种草面积随时间变化的趋势在总体上是相反的, 造林种草面积增大则悬沙中值粒径减小。

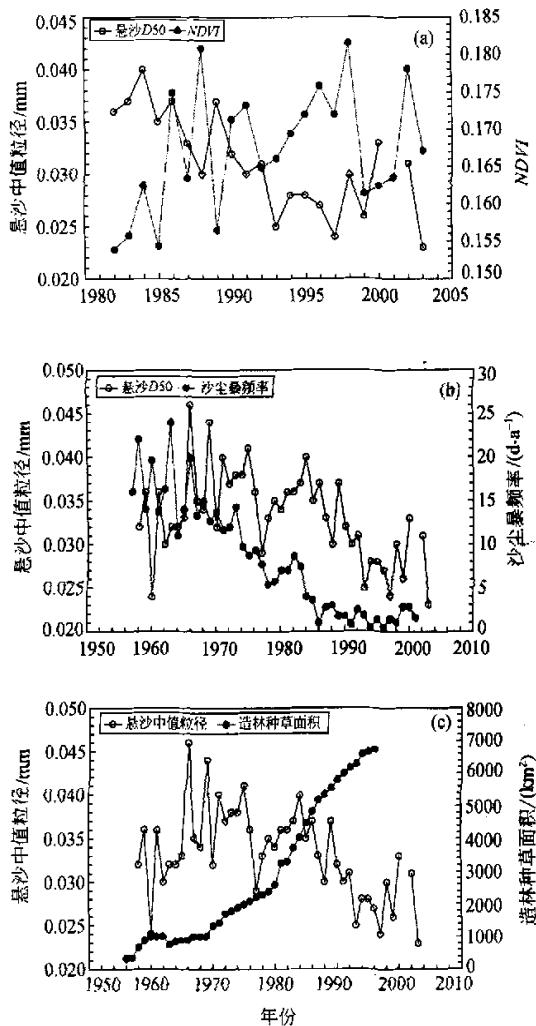


图6 白家川站历年年平均悬沙中值粒径变化情况
 (a) 中值粒径和无定河全流域年平均NDVI随时间的变化;
 (b) 中值粒径和无定河全流域沙尘暴频率随时间的变化;
 (c) 中值粒径和无定河全流域造林种草面积随时间的变化

为了进一步揭示沙尘暴、植被覆盖变化和造林种草与悬沙中值粒径的关系, 我们以历年资料为基础, 在图7(a)中点绘了白家川站年平均悬沙中值粒径与无定河流域沙尘暴发生频率的关系, 在图7(b)中点绘了年平均悬沙中值粒径与无定河流域年平均NDVI的关系, 在图7(c)中则点绘了年平均悬沙中值粒径与无定河流域造林种草面积的关系。悬沙中径与沙尘暴频率的关系显示出一定的正相关, 说明沙尘暴频率的减小导致了无定河悬沙中值粒径的减

小。悬沙中径与NDVI的关系显示显示一定的负相关。悬沙中径与林草面积的关系, 在林草面积小于3000 km²时比较散乱, 当林草面积大于3000 km²后则有较好的负相关。这是由于, 林草面积的增大和风沙区植被覆盖度的增加, 使地表物质在一定程度上受到保护, 风蚀强度减弱, 进入河道的风成沙减少。由于风成沙的粒度大于黄土的粒度, 风成沙的减少导致了悬沙粒径变细。另一方面, 植被覆盖度的增大增加了地表对风的摩擦阻力, 减小了近地面

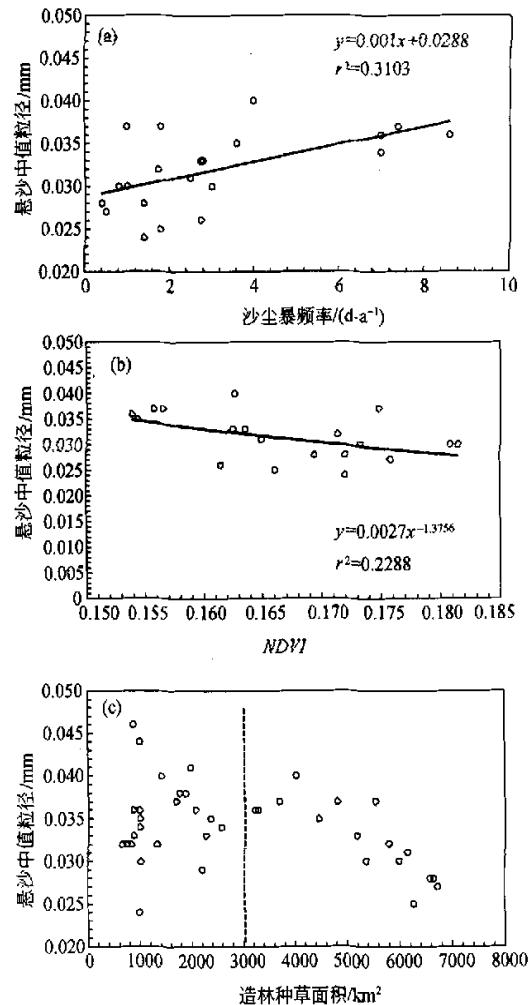


图7 白家川站年平均悬沙中值粒径与无定河流域沙尘暴发生频率、平均NDVI的关系、流域造林种草面积的关系
 (a) 中值粒径与无定河流域沙尘暴发生频率的关系;
 (b) 中值粒径与无定河流域年平均NDVI的关系;
 (c) 中值粒径与无定河流域造林种草面积的关系

风速，也降低了沙尘暴的发生频率。可以认为，存在着如下的因果关系链：植被好转导致了沙尘暴减少；沙尘暴的减少使得进入河道的风成沙数量减少；进入河道的风成沙数量减少导致了粗泥沙输沙量减少，因而悬沙粒度变细。

为了较全面地反映各个影响因素对悬沙粒径变化的影响，我们基于年系列资料，以白家川站的年平均悬沙中值粒径的对数值 $\ln D_{50}$ 为因变量，以沙尘暴频率 D_{ss} 、全流域汛期（6—9月）面平均雨量 P_{6-9} （mm）、全流域平均 NDVI 和全流域林草面积 A_{fg} （ km^2 ）为影响变量，进行了多元回归分析。表中给出了各个变量之间的相关系数矩阵。由于各变量资料起止年限不同，面平均雨量和林草面积截止于1996年，而 NDVI 资料始于1982年，故完全配套的资料为1982—1996年，共15年。运用这15年的资料，建立了回归方程如下：

$$\begin{aligned} \ln D_{50} = & -1.77 - 0.047 D_{ss} + 0.00018 P_{6-9} - \\ & 4.07355 \text{ NDVI} - 0.00017 A_{fg} \end{aligned} \quad (2)$$

上式的复相关系数 $R = 0.909$ ，F-检验的结果 $F = 11.936$ ，显著性概率为 $p = 0.0008$ ，剩余标准差 $SE = 0.06844$ 。由于各个变量的变化范围不同，不能按回归系数的大小来判断各个影响变量的变化对 $\ln D_{50}$ 的贡献的大小。为此，对各个变量的数值进行了标准化，使它们处于可比的范围内，即0与1之间，重新建立了常数项为0的回归方程如下：

$$\begin{aligned} \ln D_{50} = & -1.77 - 0.809 D_{ss} + 0.0741 P_{6-9} - \\ & 0.250 \text{ NDVI} - 1.358 A_{fg} \end{aligned} \quad (3)$$

式中各个影响变量系数的大小反映其对悬沙中值粒径变化的贡献的大小。因此，按照贡献率的大小，将各个影响变量排序如下：（1）林草面积；（2）沙尘暴频率；（3）NDVI；（4）汛期降雨量。

表1 各个变量之间的相关系数矩阵

	D_{ss}	P_{6-9}	NDVI	A_{fg}	$\ln D_{50}$
D_{ss}	1.00	0.23	-0.68	-0.86	0.55
P_{6-9}	0.23	1.00	-0.06	-0.15	0.11
NDVI	-0.68	-0.06	1.00	0.63	-0.56
A_{fg}	-0.86	-0.15	0.63	1.00	-0.83
$\ln D_{50}$	0.55	0.11	-0.56	-0.83	1.00

3.4 对于其他影响因素的讨论

上文中主要讨论了沙尘暴频率、植被因素和降水特性的变化对无定河悬沙粒径变化的影响。除了这些因素以外，水利工程和水土保持工程措施对悬沙粒径也有一定的影响。无论是水库还是淤地坝，均具有“拦粗排细”的作用。由于基准面的抬高，水流流速减慢，有利于粗泥沙的堆积，使得自水库或淤地坝下泄的泥沙有变细的趋势。无定河流域中修建了大量的淤地坝和水库，也是悬沙粒径变细的原因之一。张经济等曾对无定河流域水库拦沙量和淤地坝拦沙量进行过分析，计算出了历年的水库拦沙量和淤地坝拦沙量^[14]。我们将无定河白家川站历年的悬沙中值粒径 (D_{50} , mm) 与历年的水库拦沙量 ($R_{s,r}$, 10^4 t) 和淤地坝拦沙量 ($R_{s,c}$, 10^4 t) 建立关系，发现当拦沙量较小时，数据点分布散乱，但当水库年拦沙量大于 $3300 \times 10^4 \text{ t}$ 、淤地坝拦沙量大于 $8100 \times 10^4 \text{ t}$ 时，数据点分布较为集中，得到以下关系：

$$D_{50} = -8 \times 10^{-7} R_{s,r} + 0.0374 \quad (4)$$

$$(r^2 = 0.1745, n = 11)$$

$$D_{50} = -8 \times 10^{-7} R_{s,c} + 0.0475 \quad (5)$$

$$(r^2 = 0.4116, n = 7)$$

上述关系表明，当拦沙量超过某一数值之后，悬沙粒径随着水库和淤地坝拦沙量的增大而变细。然而，由于水库拦沙量和淤地坝拦沙量的数据不能与（2）式中其他变量的数据匹配，故进行回归分析时未能包括这两个变量。

4 结论

全流域年平均 NDVI 的变化在总体上表现出增大的趋势，流域内毛乌素风沙区 NDVI 的增大更为显著。历年累积的造林和种草面积也表现出显著的增大趋势。

植被覆盖状况的改善，特别是作为本区沙尘暴主要物源区的毛乌素沙地植被覆盖状况的改善，导致了沙尘暴的发生频率的减小。沙尘暴的减少使得进入河道的风成沙数量减少，进入河道的风成沙数量减少导致了悬沙粒度变细。

以沙尘暴频率 D_{ss} 、全流域汛期（6—9月）面平均雨量 P_{6-9} 、全流域平均 NDVI 和全流域林草面

积 A_{tg} 为影响变量, 建立了无定河悬沙中值粒径与上述影响变量之间的多元回归方程, 并对各个影响变量变化对悬沙粒变化的贡献率进行了估算。按照贡献率的大小, 各个影响变量的顺序如下: (1) 林草面积; (2) 沙尘暴频率; (3) NDVI; (4) 汛期降雨量。

参考文献

- 1 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(3): 540—548
- 2 陈永宗, 景可, 蔡强国. 黄土高原现代侵蚀与治理. 北京: 科学出版社, 1988, 1: 170
- 3 景可, 陈永宗, 李凤新. 黄河泥沙与环境. 北京: 科学出版社, 1993, 1: 248
- 4 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
- 5 徐建华, 牛玉国. 水利水土保持工程对黄河中游多沙粗沙区径流泥沙影响研究. 郑州: 黄河水利出版社, 2000, 32
- 6 冉大川, 柳林旺, 赵力仪, 等. 黄河中游河口镇之龙门区间水土保持与水沙变化. 郑州: 黄河水利出版社, 2000
- 7 汪岗, 范昭(主编). 黄河水沙变化研究. 第1卷, 郑州: 黄河水利出版社, 2003
- 8 汪岗, 范昭(主编). 黄河水沙变化研究. 第2卷, 郑州: 黄河水利出版社, 2003
- 9 王万忠, 焦菊英. 黄土高原侵蚀产沙强度的时空变化特征. 地理学报, 2002, 57(2): 210—217
- 10 许炯心. 黄河中游风水两相作用对侵蚀产沙地域分布的影响. 自然科学进展, 2007, 17(1): 49—56
- 11 许炯心. 土地利用变化对鄂尔多斯高原周边地区沙尘暴的影响. 地理研究, 2004, 23(4): 463—468
- 12 许炯心. 黄土高原地区沙尘暴形成的自然地理因素: I. 影响因素分析. 中国沙漠, 2005, 25(4): 547—551
- 13 许炯心. 黄土高原地区沙尘暴形成的自然地理因素: II. 多元回归分析. 中国沙漠, 2005, 25(4): 552—556
- 14 张经济, 冀文慧, 冯晓东. 无定河流域水沙变化现状、成因和发展趋势研究. 见: 汪岗, 范昭(主编), 黄河水沙变化研究, 第2卷. 郑州: 黄河水利出版社, 2003, 393—429
- 15 Tucker CJ. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1979, 8(2): 127—150
- 16 Nemani R, Running SW. Testing a theoretical soil leaf hydrologic equilibrium of forests using satellite data and ecosystem simulations. *Agricultural Forestry Meteorology*, 1989, 44: 245—260
- 17 Asrar G, Kanemasu ET, Jackson RD, et al. Estimation of total dry matter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 17: 211—220
- 18 Pinzon J. Using HHT to successfully uncouple seasonal and interannual components in remotely sensed data. *SCI 2002. Conference Proceedings Jul 14—18, Orlando, Florida*
- 19 Pinzon J, Brown ME, Tucker CJ. Satellite time series correction of orbital drift artifacts using empirical mode decomposition. In: Huang N, ed. *Hilbert-Huang Transform: Introduction and Applications*, Chapter 10, Part II. Applications, 2004
- 20 Tucker CJ, Pinzon JE, Brown ME, et al. An extended AVHRR 8 km NDVI data set compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(20): 4485—4498
- 21 Zhou L, Kaufmann RK, Tian Y, et al. Relation between interannual variations in satellite measures of northern forest greenness and climate between 1982 and 1999. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(1): 1029—2002
- 22 Zhou L, Tucker CJ, Kaufmann RK, et al. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981—1999. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(17): 2006—2008
- 23 夏训诚, 杨根生, 等. 中国西北部地区沙尘暴灾害及其防治. 北京: 中国环境科学出版社, 1996