# 沙质河道冲刷不平衡输沙机理及规律研究

# 刘金梅,王光谦,王士强

(清华大学水沙科学教育部重点实验室,北京 100084)

摘要:通过动床水槽试验,观测沙波运动,揭示了湍流扫荡河床使表层床沙产生频发的群体起动冲刷现象。据此, 提出了床沙交换及冲刷粗化分二个层次的物理模式;分析了冲刷时表层床沙粗化的必然性,确定了悬移质扩散过 程中适于非均匀沙河床的新的近底边界条件。依据所建立的不平衡输沙立面二维数学模型,计算了大量不同情况 下的含沙量扩散恢复过程,据此总结出了冲刷时含沙量恢复饱和系数 的预报公式及变化规律。

**关 键 词**:沙质河道;河道冲刷;不平衡输沙;机理 中图分类号:TV143;TV147 **文献标识码**:A **文章编号**:1001-6791(2003)05-563-06

冲积河流中水流的不平衡输沙问题是河流动力学及河床演变学领域的重要问题,在生产和学术上具有重要 研究价值。在天然河流、水库内,不平衡输沙过程常以百公里计。此过程的计算严重影响到河道冲淤分布及冲 淤速率,当研究河段长度小于不平衡输沙距离时,还会严重影响到该河段的泥沙冲淤总量。在我国,黄河、长 江等大江大河的泥沙均比较细,不平衡输沙问题突出;尤其随着黄河小浪底水库及长江三峡水库的建成,下游 沙质河道冲刷不平衡输沙的研究更具重要的现实意义。

以往对不平衡输沙的研究,主要有2类:第1类<sup>[1,2]</sup>主要从悬移质紊动扩散方程出发,求解得出含沙量恢 复饱和过程的解析解或者数值解。这类研究中的底部边界条件,迄今均未考虑河床冲刷伴生的表层非均匀沙床 沙组成粗化,因而使计算含沙量恢复饱和距离远远小于天然河流实际冲刷距离。第2类为以韩其为<sup>[3]</sup>为代表的 引入含沙量恢复饱和系数 直接推求平均含沙量沿程变化的研究,依据实际资料反算率定 值。这类预报十 分简便,在我国得到了广泛应用。但对于恢复饱和系数的取值目前仍停留在经验阶段。尤其在一些黄河冲淤数 学模型中,由于实际率定的恢复饱和系数 变化很大,对其取值尚无规律可循。

笔者<sup>[4~6]</sup>在求解悬移质扩散方程中,针对非均匀沙河床计算发现,表层床沙组成冲刷粗化大大延长了冲刷 不平衡输沙距离。在立面二维悬移质扩散方程数学模型中的河床冲刷沙量平衡方程中,引入了床沙交换速率。 该速率愈小,则表层床沙粗化愈显著,含沙量恢复饱和距离愈长。在前人及笔者以往研究的基础上,本文对冲 刷不平衡输沙机理及规律进行了更深入的研究<sup>[7]</sup>。

1 床沙交换机理探索试验

在以往的河床冲刷变形数学模型及冲刷粗化研究中,引入了一个床沙活动交换层厚度的概念。根据试验观 测和分析,自尹学良<sup>[8]</sup>以来,愈来愈多的研究者认为沙质河床的床沙活动交换与沙波运动密切相关,在较长时 间内沙质河床的床沙活动交换层及冲刷粗化层总厚度应该大约是沙波高度。

笔者研究认为,在短时段内床沙交换厚度远小于总厚度,这时很有必要引入一个实际存在的床沙交换速率 *v*<sub>sy</sub>的新概念,这样表层床沙的冲刷粗化计算与所取计算时段长短无关。为了得出*v*<sub>sy</sub>的较普遍的预报公式,本

收稿日期: 2002-06-18; 修订日期: 2002-12-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59890200;59879006)

作者简介:刘金梅(1975-),女,湖北钟祥人,博士,主要从事不平衡输沙研究。Email:liujm6@mwr.gov.cn



图 1 床沙交换速率与 \* 的关系

文在 16 m 长可调坡循环水槽内进行了动床沙波试验<sup>[7]</sup>。以沙波的垂向位移速率作为床沙交换速率值。

图 1 列出了本文试验成果及其它一些水槽试验和天然 河流实测资料。由图 1 可见,在相同水深和床沙条件下, 当水力条件处于阻力低能态区时, \*越大, V<sub>sy</sub>越大;而当 水力条件增大到阻力过渡区后, V<sub>sy</sub>随 \*的增加而变小。在 低能态区,随着相对水深 H/D 的增大,在相同 \*时 V<sub>sy</sub> 急剧减小。在天然河流内,由于沙波运动周期远远大于水 槽内情况,因此 V<sub>sy</sub>远小于水槽情况。据图 1 得出的床沙交 换速率的初步经验公式为

$$\frac{V_{sy}}{\sqrt{D_{50}g}} = \begin{cases} k^{-\frac{2.60}{4}} & (* k) \\ 1.385 \times 10^{-4} & 2.6 \\ (* b) & (-2) & (-2) \\ (-2) & (-2) & (-2) & (-2) \\ (-2) & (-2) & (-2) & (-2) \\ (-2) & (-2) & (-2) & (-2) \\ (-2) & (-2) & (-2) & (-2) \\ (-2) & (-2) & (-2) & (-2) &$$

Fig. 1 Relationship between exchanging rate and · 式中  $k = 0.4e^{-0.00136 \begin{pmatrix} \mu \\ D_{50} \end{pmatrix}}$ ;  $_{k} = 0.212e^{0.000265 \begin{pmatrix} \mu \\ D_{50} \end{pmatrix}}$ ; \*为 剪切力( \* =  $R J/(s^{-1}) D_{50}$ ); g为重力加速度; H为水深;  $D_{50}$ 为中值粒径。当  $H/D_{50} > 5000$ 时, 取  $H/D_{50} = 5000$ 。

国外一些学者<sup>(9,10)</sup>的试验研究表明,湍流扫荡床面能使非粘性的表层床沙发生群体起动冲刷,改变了以往 的以颗粒起动冲刷的传统认识。由于水流湍流向床面频繁的扫荡作用,床面表面薄层内的泥沙可以群体一束一 束的型式同时起动冲刷。王桂仙等在轻质沙沙波试验中也曾发现此种现象广泛存在。本文研究认为,这种湍流 扫荡床面形成的群体泥沙起动冲刷是表层床沙和水中泥沙交换的重要动因,湍流扫荡引起的群体泥沙起动冲刷 能使床沙在一定厚度内频繁地与水中泥沙同时直接发生交换,在这个厚度内的粗细泥沙也必定可同时发生直接 活动交换。这就为建立新的表层床沙活动交换、冲刷时表层床沙粗化的计算方法提供了物理依据。为此,本文 通过水槽试验着重对这方面进行了探索试验和分析。

试验中对床面表层群体起动情况应用摄像进行了观测,并应用王兴奎教授提供的相关软件在计算机上对摄 像资料进行了处理分析,每幅摄像时间间隔为 0.04 s。大量观测发现,湍流扫荡在床面薄层内形成一系列随机 的微型冲坑。图 2显示了某两个有代表性的微型冲坑纵剖面形态随时间变化情况, x、y分别为微型冲坑沿水 流流向及沿水流垂向长度,单位为 mm。

本文分析统计了大量这种随机的表层床沙微型 冲坑的基本要素,表1列出了粗略的平均最大长 度、平均最大深度值 H及其与床沙 D<sub>50</sub>的比值。 图 3显示了同地接连发生的某过程中 2 个代表性的 微型冲坑的深度 H与床沙中径 D<sub>50</sub>比值随时间变化 情况。这些微型冲坑的平均最大深度与 1 mm 同一 数量级,可达床沙中径的 10 倍甚至数十倍,而长 度约为深度的 5 倍。 表1 微型冲坑的平均最大长度和深度

	lable 1 Average maximum length and					
	depth of the minisizing erosion pits					
	测次	<i>V</i> / (m·s <sup>-1</sup> )	*	平均最 大长度	平均最 大深度	$\underline{H}$ D <sub>50</sub>
_				/ mm	/ mm	
	S1-1	0.29	0.141	3.98	1.26	14
	S1-2	0.42	0.264	5.34	1.66	18
	S1-3	0.51	0.387	5.20	0.67	7
	S2-1	0.40	0.265	4.57	1.52	10

本文应用 Gyr<sup>(10)</sup>等的试验成果,计算了相应于本文各测次试验水力条件下的两次湍流扫荡之间的间隔时间,平均在1s上下,而一次扫荡平均持续时间在0.5s上下。将此与本试验中各相应的代表性的微型冲坑发生的间隔及持续时间相比较,发现两者相当接近。由此可见,试验中测到的一系列随机频发的微型冲坑,确实是由于湍流扫荡床面形成的。本试验中流速不高,但平均每隔1~2s周期,新的湍流扫荡又几乎在原地河床上形成新的微型冲坑。说明这种湍流扫荡使表层床沙群体上扬起动的频发程度相当高,在河床上扬泥沙总通量中占有重要份量,是形成河床表层床沙活动层的主要机理。



图 2 测次 *s*1-3 中因扫荡作用形成的某两个微型冲坑随时间变化





图 3 测次 *S*1-2 中因某两次扫荡作用形成的 微型冲坑相对深度随时间变化

Fig. 3 Change of comparatively depth of the minisize erosion pits (resulted by two sweeps) along with time during the test S1-2

## 2 床沙交换及河床冲刷粗化物理模式

冲刷不平衡输沙过程中,在非均匀沙河床表层内建立沙量平衡方程为

$${}_{s}i_{b0j}dzdx + {}_{s}(i_{b0j} - i_{bj})V_{sy}dtdx = qdtdS_{j}$$
(2)

通过推导论证和大量计算表明<sup>(7)</sup>,由于同一水流条件下,较细泥沙的冲刷率总是大于较粗泥沙的冲刷率, 因此对于天然非均匀沙河床而言,冲刷总会引起表层床沙级配变粗。即表层混合沙中较细的几个粒径组的级配 冲刷时的 *ibi*总小于初始级配 *ibi*;。

这种冲刷粗化首先必定在与水流直接接触的河床表层发生,据计算其厚度与1mm同一数量级<sup>[7]</sup>,这就与本文试验中通过摄像观测到的湍流扫荡河床的冲刷作用深度接近。在这一与水流直接接触的河床表面薄层内,形成了第1层次的床沙活动交换层,在河床冲刷时则形成第1层次的冲刷粗化层。同时,通过沙波运动和其它大尺度的群体床沙运动,形成了第2层次的床沙交换和冲刷粗化。

本文及前人实验成果作为物理依据,提出如下新的概化的床沙活动交换及冲刷粗化模式。床沙活动交换和 冲刷粗化从动因及范围、时间尺度、作用等方面看,可以分成2个不同层次但相互密切联系的模式。表2列出 了这两个不同层次的床沙活动交换模式的特点和差别。床面薄层内的冲刷粗化床沙通过沙波运动以 V<sub>sy</sub>速率不 断移至波谷(深层),成为较长时间内沙波高度范围内床沙逐渐粗化的基础。

表 2 两种不同层次且相互联系的床沙活动交换及冲刷粗化模式

Table 2	Two related	physical	models of	the bed	material	exchange i	n different	levels
Table 2	1 wo related	physical	mouchs of	the bea	I IIKI ULI KII	CACIMINGC I	ii uniciciit	it vers

	主要动因	厚度	时间	作用
第1层	湍流扫荡床面	限于床面表层 10 倍至几十倍颗 粒中径,与 1 mm 同一数量级。	以 s 计	在床面薄层内迅即形成冲刷粗化层,直接减低水流挟 沙力及延长冲刷不平衡输沙距离。
第2层	沙波运动	沙波高度,在天然沙质河流中与 1m同一数量级。	在天然河流中以 d 计	使冲刷持续稳定进行;在沙波高度内积存床面薄层内 的粗化床沙,使总的床沙活动层内的床沙逐渐粗化。

### 3 悬移质扩散过程中非均匀沙河床冲刷时的底部条件

均匀流下的立面二维悬移质扩散基本方程为

 $\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ x \frac{\partial c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ y \frac{\partial c}{\partial y} \right] + \frac{\partial c}{\partial y}$ 

565

(3)

悬移质扩散方程求解中最关键又最难确定的是底部边界条件。迄今提出的各种底部条件大体上可分为通量型、浓度型和梯度型3类<sup>[1,2,6,11]</sup>。对于均匀流均匀沙河床情况,在文献[6]中曾分析比较了浓度型和梯度型底部边界条件的区别,浓度型因假定底部浓度沿程不变,必然导致泥沙上扬通量沿程减小,理论上是不可能的,与实际不符。通量型底部条件以韩其为<sup>[11]</sup>提出的表达式为代表。笔者认为,在悬移质扩散方程适用的悬移区内,高程 y 处的泥沙沉降通量 D(y) 为 c(y),上扬通量 E(y) 为  $_y \partial c(y) / \partial y$ 。而在 y = 0 处,一般都有不同比例的泥沙处于非悬移状态,泥沙沉降通量是  $D(y) = _1 c(y)$ ,  $_1$  才可能不等于 1.0。通量型和梯度型底部条件的共同点是假定泥沙上扬通量沿程不变,这对均匀流均匀沙情况是完全合理的。

对于非均匀沙河床冲刷不平衡输沙过程,由于表层床沙随冲刷迅即粗化,且这种粗化程度沿程弱化,因而 泥沙上扬通量 *E*<sub>a</sub> 沿程就不再是常数。对于非均匀混合沙中的每个粒径组泥沙,本文提出了如下新的梯度型边 界条件:



- 图 4 冲刷不平衡输沙过程表层床沙组成 沿程变化算例
- Fig. 4 Surface bed material composition changing along with the longitudinal distance during the erosion non-equilibrium sediment transport process

$$E_{ja}(x) = - \left. \frac{\partial c}{\partial y} \right|_{y=a} = _{jl}(x) i_{b0j-j} c_{a*j}$$

$$\tag{4}$$

式中  $E_{ja}(x)$  为纵向距离 x 时 y = a 处的泥沙上扬通量;  $c_{a*j}$ 为第 j 粒径 组泥沙当  $i_{b0j} = 100$ %时 y = a 处的挟沙力浓度;  $i_{b0j}$ 为该粒径组泥沙初 始床沙或下层床沙级配比;  $_{jl}(x)$  为表层床沙冲刷粗化系数, 由  $_{jl}(x)$  $= i_{bj}(x) / i_{b0j}$ 确定;  $i_{bj}(x)$  为纵向距离 x 时冲刷粗化后该粒径组床沙级 配比;  $_{j}$  为该粒径组泥沙沉速。 $i_{bj}(x)$  或  $_{jl}(x)$  为未知数, 但同时增加 了沙量平衡方程组式(2), 与悬移质扩散方程联解, 在求解得出水中各 点浓度 c(x, y)的同时, 可计算得出  $i_{bj}(x)$  及  $_{jl}(x)$ , 图 4 即为一算例 成果,  $_{jl}(x)$  沿程增加趋于 1.0。即非均匀沙河床冲刷时泥沙上扬通量 沿程必定增加, 这与实际完全一致。水库下游河道经过长期冲刷, 床 沙粗化且沿程细化, 挟沙能力沿程增加, 这种实际情况反映了第 2 层次 的床沙冲刷粗化情况, 是本文计算的第 1 层次的床沙冲刷粗化沿程变 化(图 4) 累积形成的。此例中均匀流水深为 3 m、流速为 2 m/s、粒径 D <0.5 mm 以下的混合沙分成 4 组, 图中 S-1~S-3 为 D < 0.1 mm 的 3 个 较细粒径组。

#### 4 非均匀沙河床冲刷过程中的含沙量恢复饱和系数

笔者建立了考虑表层床沙冲刷粗化的悬移质不平衡输沙立面二维数学模型,经初步验证与实际符合良好<sup>(6,7)</sup>。应用该模型,对6种床沙组成、18种水流条件共108种不同情况的含沙量冲刷扩散恢复过程进行了计算。计算床沙中径 *D*<sub>50</sub>为 0.08~0.25 mm,平均流速为1~2.5 m/s,水深1~10 m。大量计算结果显示,对于非均匀沙河床,表层床沙冲刷粗化使不平衡输沙距离大大延长,不平衡输沙距离随粒径变细迅速增长;随流速增大或水深增大而增长。

本文利用这些冲刷过程的计算成果,反算得出了不同床沙及水流情况下的平均含沙量恢复饱和系数 ;值。 对同一种情况,不同距离处的 ;值十分接近,因此一种情况的冲刷恢复过程可简单地用一套各粒径组的 ;值 反映表示。将各混合沙分成 4 个粒径组,其中较细的 3 个粒径组 D<sub>i</sub>的 ;比不计及表层床沙冲刷粗化的 ;都要 减小,统计分析各种情况的反算 ;值,可归纳出如下关系:

$$_{i} = k_{i} F r^{-m_{i}}$$
<sup>(5)</sup>

 $\vec{x} \oplus k_i = 0.01366 - 0.00272D^{*1} + 0.01686D^{*2} - 0.00215D^{*3}; \quad m_i = 1.12459 + 0.37013D^* + 0.03534D^2 - 0.01439D^3; \quad D^* = D_i [g(s - i)/i]^2 J^{\frac{1}{3}}; \quad Fr = V/\sqrt{gH_o}$ 

对于常见的 4 个粒径组( $D_i = 0.005 \sim 0.025$ ,  $0.025 \sim 0.05$ ,  $0.05 \sim 0.1$ ,  $0.1 \sim 0.25$  mm),  $k_i$  分别为 0.122、 0.029、 0.017 及 0.014,  $m_i$  分别为 1.23、 1.47、 1.82 及 2.25, 此 4 组的 i 与 Fr 关系见图 5。由图 5 可见,  $D_i$  愈大, 其线愈陡, 即 $m_i$  愈大, 而 $k_i$  愈小。在大Fr数时, i 值随 D + 增大而减小, 但在小Fr数时, 较粗粒径(D + 大)的i 值可能反而超过较小D + 对应的i 值,在小Fr数时, i 值在 1.0 附近。i 的这一变化规律经分析是合理的<sup>(7)</sup>。随着弗劳德数Fr 增大,水流挟沙能力增大,冲刷率增大,较细颗粒的 $i_{b'}$   $i_{b0}$ 愈加小于 1.0,即整体床沙组成愈粗,以致冲刷恢复饱和距离愈延长,恢复饱和系数i 值愈减小。另外, D• 愈粗,随着Fr 增大,挟沙能力增大速率愈大,导致 $m_i$ 愈大。

本文应用式(5)计算 ;值,对黄河下游铁谢-高村河段6个站1961





年 9 月 14~16 日的冲刷情况进行了验证计算,与实际基本符合<sup>[7]</sup>,说明本文总结的冲刷 预报关系基本符合 实际,可作为河床变形冲刷计算参考。本文总结得出的 *i* 值预报关系是在河道初始床沙级配 *i*<sub>b0j</sub>沿程不变情况 下得出的,是相对于 *i*b0j相应的较高的挟沙能力而言得出的。对于经长期冲刷的下游河道床沙组成(*i*bj(x))情况,普遍比初始(*i*b0j)情况粗化,从沿程来看则又不断细化,若依据 *i*bj(x)相应的降低了的挟沙能力而言,则 *i* 值对于不同粒径及水流条件均接近 1.0。

#### 5 结 语

(1)由动床水槽试验,通过摄像及分析,在立面上初步揭示了这种由于湍流扫荡床面引起的在床面薄层内床沙群体起动冲刷的形态及尺度随时间的变化过程。此类新起动冲刷形式呈现一系列频发的随机的微型冲坑, 其深度可达数十倍床沙中径。在此薄层内,床沙之间及与水中泥沙发生直接普遍的活动交换,冲刷时将在此薄层内形成直接粗化层。

(2) 研究提出了 2 个层次的床沙活动交换概化物理模式和床沙活动交换速率 Vsy 的新概念及其预报公式。 分析总结了这两个层次的床沙交换和冲刷粗化在动因、时间、尺度及作用等方面的差别,同时分析了两者之间 的相互联系。

(3) 对于悬移质扩散恢复过程,提出了针对非均匀沙床沙的计算及表层床沙沿程冲刷粗化的近底边界条件,这种表层床沙冲刷粗化,使冲刷不平衡输沙距离大大延长,对冲刷不平衡输沙过程产生重大影响。

(4) 应用笔者建立的新的悬移质立面二维不平衡输沙模型,计算和分析了大量各种不同情况的冲刷过程的 计算成果,总结出反算的含沙量恢复饱和系数 的简化计算公式,其值主要取决于弗劳德数 Fr 及粒径大小。 对于相同粒径组泥沙, 值随 Fr 数增大而递减,粒径愈粗,递减率愈大。此 值预报公式可供各河床冲刷计 算数模参考应用。

#### 参考文献:

- [1] 侯晖昌. 河流动力学基本问题[M]. 北京: 水利出版社, 1982.
- [2] 张启舜.明渠水流泥沙扩散过程的研究及应用[J].泥沙研究,1980(1):37-52.
- [3] 韩其为. 悬移质不平衡输沙的研究[A]. 河流泥沙国际学术讨论会论文集[C]. 北京:光华出版社, 1980. 793 800.
- [4] Liu Jinmei, Wang guangqian, Wang Shiqiang, Effect of coarsening of surface bed material on non-equilibrium sediment transport process during river degradation[J]. International Journal of Sediment Research, 1999, 14(2):275 - 283.
- [5] 刘金梅,王士强,王光谦. 河流冲刷过程中表层床沙粗化对不平衡输沙的影响[J]. 水科学进展,2000,11(3):229-234.
- [6] 刘金梅,王士强,王光谦.冲积河流长距离不平衡输沙过程初步研究 [J].水利学报,2002(2):47-53.

[7] 刘金梅.冲积河流长距离冲刷不平衡输沙机理及规律研究 [D].北京:清华大学,2002.

[8] 尹学良.清水冲刷河床粗化研究[J].水利学报, 1963(1):15-25.

[9] Grass A J. Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries [J]. J of Fluid Mechanics, 1971, 50:233 - 255.

[10] Gyr A, Schmid A. Turbulent flows over smooth erodible sand beds in flumes [J]. J of Hydraulic Research, 1997, 35:525 - 544.

[11] 韩其为,何明民.论非均匀悬移质二维不平衡输沙方程及边界条件[J].水利学报,1997(1):1-10.

#### Study on non-equilibrium sediment transport in the sandy river erosion

LIU Jin-mei, WANG Guang-qian, WANG Shi-qiang

(Key Laboratory of Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract :** The flume experiments on the mobile sand bed are made in this paper. The frequent group initiation of bed material is found to occur by the turbulent sweep. The sand-wave movement is also observed. According, two physical models of the bed material exchange in different levels are presented to prove the coarsening of surface bed material makes the recovering distance much longer than that for the condition of uniform bed material, and thus greatly effects the non-equilibrium sediment transport process. The new boundary condition considering the coarsening of the surface non-uniform bed material is obtained. Lots of non-equilibrium sediment transport process in different hydraulic and bed material conditions are calculated by the new lognitudinal-vertical 2-D mathematical model of non-equilibrium sediment transport considering the coarsening of surface bed material. Finally, the experiential expression of the recovering coefficient of sediment concentration is discussed.

Key words: sandy river; river erosion; non-equilibrium sediment transport; mechanism

# 欢迎订阅 2004 年《生态环境》

《生态环境》是经国家科技部批准的正式学术期刊,向国内外公开发行。刊号:ISSN 1672-2175;CN 44-1565/X。1992年创刊。入 选中国核心期刊(遴选)数据库、中国科学引文数据库:被评为广东省优秀期刊、广东省优秀科技期刊、全国优秀农业期刊(一等奖)、 中国学术期刊(光盘版)规范优秀期刊。主要刊登国内外生态学、环境科学及其相关的许多领域具有创新性的重要研究论文,以及 对热点问题和前沿问题富有启发性的高水平的综述。刊登内容广泛,是一种多学科互相渗透和相互综合的刊物。适合从事生态 学、环境学、资源保护、土壤学、大气科学、水科学、地理学、地质学、地球科学、农业科学、林学、医学、社会科学、经济科学等广大领域 的科技人员、学者、教师、学生、各级管理者和环境爱好者阅读。

**全铜版纸精美印刷**,季刊,大容量,大16开,正文150页/册,定价12.50元/册,全年定价50元(含邮资)。**邮发代号**46-272,欢迎 订阅。如错过邮局订阅期限,可直接向编辑部订阅。

邮局汇款:广州市天河区天源路808号广东省生态环境与土壤研究所《生态环境》编辑部,邮编510650。

银行汇款:开户银行:中国工商银行广州市沙河办事处,帐号:3602002709002419786,收款单位:广东省生态环境与土壤研究所。 本刊网址:http: www.eco-environment.com

电子信箱 :editor @eco-environmrnt.com

电话:(020)87024961

<sup>\*</sup> The project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 59890200 & No. 59879006).