

河流悬沙浓度的地面遥感预测方法初步研究

——以金沙江下游支流为例

周跃¹, 吕喜玺², 陈平³, S Liaw³

(1. 昆明理工大学 环境科学与工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 新加坡国立大学 地理系, 119260, 新加坡;
3. 新加坡国立大学 遥感图像处理中心, 119260, 新加坡)

摘要: 以金沙江中下游一级支流龙川江为例, 通过探讨河流地面反射光谱与河流悬沙浓度的关系, 初步开发了河流悬沙浓度的地面遥感预测技术. 研究发现, 基于 R800/R550 的经验模型, 仅能够预测浓度范围在 400 g/m^3 以下的悬沙浓度值, 对于较低悬沙浓度的河流或其他水域有较大运用价值. 光学拟合技术能够预测龙川江在其整个变化范围的河流悬沙浓度, 最高预测浓度可以达到 13000 g/m^3 . 通过直接运用两种方法, 或者进一步将它们提升成为卫星遥感运用技术后, 对于中国西南众多的江河湖库有着重要的理论和现实意义.

关键词: 龙川江流域; 悬沙浓度; 地面遥感; 预测方法

中图分类号: S4143 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2005)05-0083-04

Preliminary Study on Estimation of Suspended Sediment Concentration in Rivers with in-Situ Remote Sensing Technique —— an Example from the Lower Jinsha Tributary

ZHOU Yue¹, ZHU Yun-mei¹, LU Xi-xi², CHEN Ping³, S Liaw³

(1. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China
2. Department of Geography, National University of Singapore, 119260, Singapore
3. Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing (CRISP), National University of Singapore, 119260, Singapore)

Abstract Taking one of the lower Jinsha tributaries Longchuan River for example, the relation between reflectance spectra and suspended sediment concentration of river water is discussed in this paper. Ground remote sensing techniques for estimating suspended sediment concentration is preliminarily developed. It is shown that the experience model based on the ratio of reflectance at 800 nm and 500 nm wavelength bands can only forecast the water with the suspended sediment concentration below 400 g/m^3 . It can be used in the rivers with lower sediment concentration. The spectral optical model can forecast suspended sediment concentration of Longchuan River in its whole range, and the highest forecast concentration can reach 13000 g/m^3 . Through the two methods or improving them to be satellite remote sensing technique, the important theory and practical significance are given for the rivers and lakes in the southwest of China.

Key words Longchuan Valley; suspended sediment concentration; in-situ remote sensing; forecast methods

0 引言

土地利用和地表形态的变化对山地水文过程的影响是人们关注的重要问题, 原因是这种影响不但关系到下游水资源的利用, 而且往往成为洪涝、土壤侵蚀等山地灾害的诱因; 关注的焦点之一是河流的悬沙浓度变化^[1].

收稿日期: 2004-10-08 基金项目: 国家 973 项目 (项目编号: 2003CB415105-6)、云南省人才基金项目 (项目编号: 1999D0027G)、云南省自然科学基金项目 (项目编号: 2002D0017M) 和国家水土保持生态修复云南大姚试点监测项目联合资助.

第一作者简介: 周跃 (1958~), 男, 硕士, 副教授. 主要研究方向: 恢复生态学、水土保持与生态工程. E-mail: Yuezhou@public.km.yn.cn

目前,人们很难对较大流域通过地面取样定量观测河流的悬沙浓度,对于边远山区的河流更是如此.遥感方法为解决这一问题提供了可能.介绍和讨论了近期我们尝试开发的预测河流悬沙浓度的地面遥感方法,该方法的基本遥感依据是水体在可见光和近红外波段的实测反射率,经过了河水悬沙浓度实测数据的验证.

1 研究地区概况

龙川江是长江上游金沙江的一级支流,位于金沙江南岸云南省楚雄州境内,北纬 $100^{\circ}50' \sim 101^{\circ}05'$,东经 $24^{\circ}30' \sim 25^{\circ}55'$,流域面积约 $6\,500\text{ km}^2$.地貌多为中山丘陵与河谷盆地,属亚热带季风气候类型,年均温 $14.8 \sim 21.9^{\circ}\text{C}$,年降雨量 $800 \sim 1\,000\text{ mm}$,雨季一般在5月底至10月中旬,雨季雨量占全年雨量的85%以上.流域内有小河口和小黄瓜园两个水文站.1998年流域内土壤侵蚀模数达到 $1\,833\text{ t/a} \cdot \text{km}^2$,龙川江含沙量 9.36 kg/m^3 ,20年里增加了2倍,成为长江泥沙的主要来源地之一^[2,3].近年来,龙川江流域先后开展了“生态环境综合治理”、“天保”、“退耕还林(草)”、“生态修复”项目等水土保持工程,旨在控制全流域的水土流失,减少进入长江的泥沙量.

2 研究方法

在2002年6月河水水位和河泥沙含量较高的雨季,使用GER1500野外光谱仪在龙川江全河段的61个观测点采测了河水反射光谱值,并在相同地点采用常规方法采水测得河水悬沙浓度.该浓度的变化范围为 $16 \sim 13\,000\text{ g/m}^3$,其中数和均值分别为 800 g/m^3 和 $1\,900\text{ g/m}^3$.

采用两种方法尝试了悬沙浓度预测.一个是通过求取在500 nm和800 nm波长的反射率比值,获得悬沙浓度经验模型.根据前人的研究^[4],把在近红外波段测得的反射率标准化为在绿光波段的反射率,它与悬沙浓度具有较好的相关关系.把从750~850 nm波段之间的所有反射率取平均值并作为800 nm的宽波段反射率,再把从500~600 nm的所有反射率取平均值并作为500 nm的宽波段反射率,然后以公式(1)计算两者的比值 r .悬沙浓度较高时, r 值趋近于一个恒定的量值 r_{∞} ,其计算公式为(2).基于公式(1)和(2),可以得到悬沙浓度 S 的计算公式(3).应该注意的是,当悬沙浓度很高时, r 与 S 相关性降低,式(3)的预测精度降低.

$$r = r_0 (1 + S/a) / (1 + S/b) \quad (1)$$

$$r_{\infty} = r_0 b / a \quad (2)$$

$$S = b (r - r_0) / (r_{\infty} - r) \quad (3)$$

式中 r 是反射率比例 R_{500}/R_{800} , S 是悬沙浓度, r_0 , a , b 是拟合参数. r_0 是悬沙浓度较低时的反射率比值.

第二种方法是基于实测水体反射率的全波段光谱分析模型^[4],一种光谱拟合技术.它用一个水体反射光学模型来拟合实测的反射光谱,并用悬沙颗粒在550 nm(X_{550})的散射系数和可溶有机质在440 nm的吸收系数作为回归参数,以求取河水悬沙浓度.结果表明,悬沙浓度与其在550 nm的散射系数满足线性回归关系.

3 结果与分析

结果表明,河水具有特定的反射光谱特征如图1所示.悬沙浓度在 $16 \sim 1\,338\text{ g/m}^3$ 的范围内,700 nm以上(即从红光到近红外光谱的区间)的反射率随悬沙浓度的增加而增加,而在500 nm附近(绿光波段)的反射率则对悬沙浓度的增加没有显著反应.图1中的反射率曲线在700 nm和800 nm波段处形成两个峰值.在 $3\,872\text{ g/m}^3$ 以上的高浓度状况下,河水在700 nm处的反射率峰值消失,而且反射率从蓝光波段到近红外波段呈单调增加见图2.

当河流悬沙浓度低于 $1\,500\text{ g/m}^3$ 时,宽波段反射率比值 R_{800}/R_{550} 较好地满足了公式(1)和图3公式的各项参数 $r_0 = 0.57$, $a = 24.9$, $b = 105.9$, 相关系数高达 $R^2 = 0.79$.值得注意的是,此时反射率比例 r 被确定在一个特定的范围,即 $r_0 = 0.57$, $r_{\infty} = r_0 b / a = 2.42$.

用 R_{800}/R_{550} 低于2.0的所有实测反射率检验公式(3)的准确性,可以得到河流悬沙浓度预测值对应于实测值相关性的散点图如图4所示.结果表明,在当悬沙浓度低于 400 g/m^3 时,预测值与实测值总体

根据云南省1999年水土流失普查资料,云南省政府水利厅.

上有较好的相关性, 预测误差不超过 49 g/m^3 , 预测结果在一定程度上可以接受. 但是, 当悬沙浓度高于 400 g/m^3 时, 相关性则大为降低, 说明公式 (3) 不可用于悬沙浓度高于 400 g/m^3 的预测. 事实上, 在龙川江流域每当雨季或洪水来临时, 悬沙浓度都高于 400 g/m^3 ; 我们有半数以上的实测悬沙浓度都高于 400 g/m^3 , 而且龙川江上两个水文站在过去 10 年中记录的悬沙浓度也高于 400 g/m^3 ^[11]. 这表明公式 (3) 对于属于高浑浊河流的龙川江流域有较大局限性.

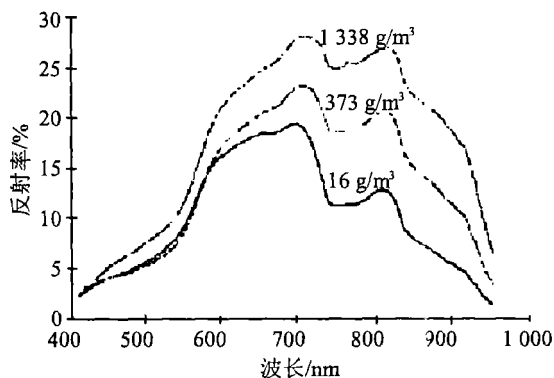


图1 不同悬沙浓度河水的反射光谱曲线 (浓度范围为 $16 \sim 1338 \text{ g/m}^3$)

Fig.1 River reflectance spectra at different SSC (SSC rang: $16 \sim 1338 \text{ g/m}^3$)

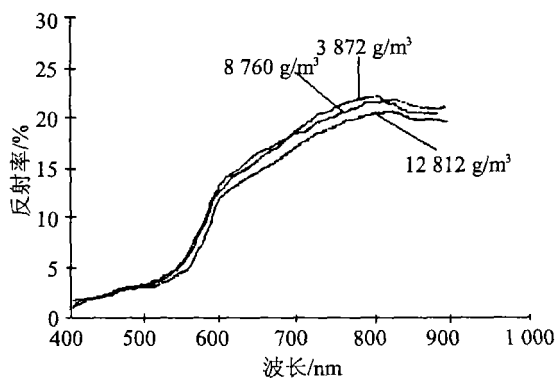


图2 不同悬沙浓度河水的反射光谱曲线 (浓度范围为 $3872 \sim 12812 \text{ g/m}^3$)

Fig.2 River reflectance spectra at different SSC (SSC rang: $3872 \sim 12812 \text{ g/m}^3$)

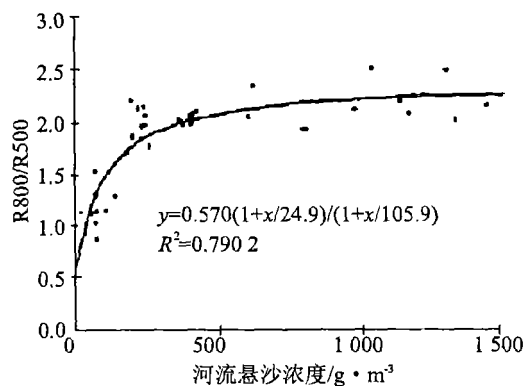


图3 低于 1500 g/m^3 时河流悬沙浓度与 $R800/R500$ 的相关关系

Fig.3 Relationship between SSC and $R800/R500$ the when SSC is below 1500 g/m^3

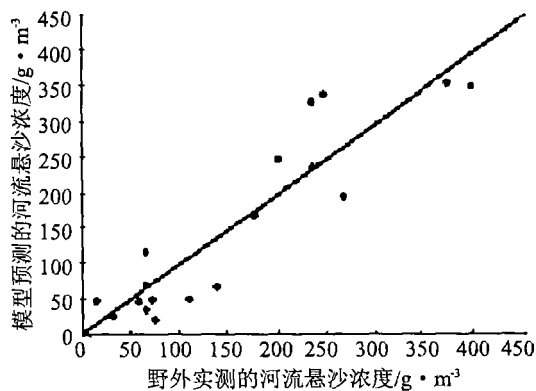


图4 低于 400 g/m^3 时采用公式(3)预测的悬沙浓度与实测值的吻合情况

Fig.4 Coherence between the predicted and measured SSC when SSC is below 400 g/m^3

鉴于这种情况, 我们用一个水体反射光学模型^[4]来拟合河水的反射光谱; 该模型的两个重要参数是从反射光谱获得的悬沙散射系数 X_{550} 和河水可溶性有机质的吸收系数. 结果发现, 在整个实测浓度范围内悬沙的散射系数 X_{550} 与其浓度有非常好的线形回归关系, 相关系数高达 $R^2 = 0.98$ 见图 5 这样, 河流悬沙浓度 (S_{TS}) 可以依据 X_{550} 采用公式 (4) 进行预测:

$$S_{TS} = X_{550} / 0.0208 \quad (4)$$

如图 5 所示, 虽然 X_{550} 与 S_{TS} 的总体相关性较高, 但是在悬沙浓度低于 400 g/m^3 时 S_{TS} 比真实浓度偏高, 也高于通过公式 (3) 的预测值. 这样, 在低浓度范围内使用公式 (4) 会使预测的悬沙浓度值偏高. 因此,

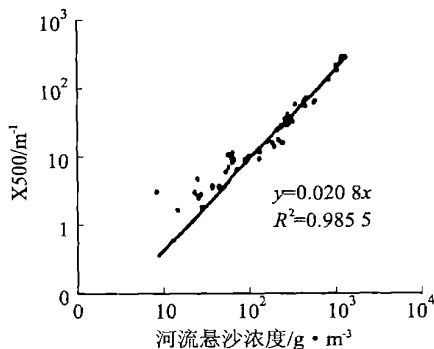


图5 沉积颗粒在 550 nm (X_{550}) 的散射

Fig.5 Relationship between backscattering coefficient and SSC when the suspended sediment at 550 nm (X_{550})

同时采用适合于低浓度范围的公式(3)和适用于高浓度范围的公式(4),将能够更加准确地预测变化范围较大的河流悬沙浓度。

4 讨论

我国西南地区江河众多见图6更有大量的湖泊和水库,它们是本研究提出的两种河流悬沙浓度预测方法的用武之地。经验公式(3)仅仅依靠河流水体在绿光和近红外光两个波段的反射率,而这两者是LANDSAT或SPOT卫星的基本遥感数据。由于地面遥感与航天遥感的光谱信息的同一性,该项基于地面遥感的河流悬沙浓度预测技术有可能上升成为适时性、实用性和宏观性更强的航天遥感预测技术。光谱分析模型,或光学拟合技术,需要较多可见光和近红外光波段的光谱信息才能进行光谱拟合分析,但是它只需要X550和G440作参数,两者可以从有限个波段中提取信息推导获得。目前LANDSAT和SPOT卫星传感器能够提供众多波段的光谱信息,完全能够满足确定这两个参数的推倒需要。因此,探索的第二种方法也可能由地面遥感预测技术上升为航天遥感预测技术。

河流悬沙浓度的变化是一个地区或流域土壤侵蚀状况的直接表征,反映了本区域土地利用转型、重大工程建设等人为活动的侵蚀环境效应。通过直接运用和进一步提升成为卫星遥感运用技术后,其方法对于中国西南众多的江河湖库有着重要的理论和现实意义。下一步,将进行悬沙性质对其散射系数的影响分析,为进一步完善该项技术和开发航天遥感悬沙浓度分析技术而努力。

5 结论

以金沙江中下游一级支流龙川江为例,通过探讨河流地面反射光谱与河流悬沙浓度的关系,试图开发河流悬沙浓度的地面遥感预测技术。研究发现,基于R800/R550的经验模型,即公式(3),仅能够预测浓度范围在 400 g/m^3 以下的悬沙浓度值,对于高浑浊河流有较大局限性。龙川江流域在雨季属于高浑浊河流,公式(3)有较大局限性。光学拟合技术能够预测龙川江在其整个变化范围的河流悬沙浓度,最高预测浓度可以达到 13000 g/m^3 。目前的研究尚处于工作早期,但是结果已经预示了其广阔的开发和运用前景。

参考文献:

- [1] Zhou Y, Lu X X, Huang Y. Changes of Water Discharge and Sediment fluxes in Yunnan Mountains with Reference to Longchuan River, Upper-Stream of the Yangtze River [A]. 见:倪绍祥.中国土地资源态势与持续利用研究[C].昆明:云南科技出版社,2004.628~634
- [2] 周跃,张军,曾和平,等.长江上游龙川江流域典型片区植被侵蚀控制作用及其水土保持意义[J].昆明理工大学学报,2004,29(3):176~180
- [3] Lu X X, Ashmore P, Wang F. Sediment Yield Mapping in a Large River Basin: the Upper Yangtze [J]. China Environmental Modelling and Software, 2003, 18(4): 339~353
- [4] Doxaran D, Froidefond JM, Castaing P. Spectral Signature of Highly Turbid Waters: Application with SPOT Data to Quantify Suspended Particulate Matter Concentrations [M]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(1): 149~161.
- [5] Liew S C, Chia A S, Lim K H, et al. Modeling the Reflectance Spectra of Tropical Coastal Waters [M]. In Ocean Optics: Remote Sensing and Underwater Imaging, Ed. G. D. Gilbert, R. J. Frouin, SPIE Proc., 2001. 248~255.
- [5] 周跃,张平,曾和平,等.长江上游在川江流域典型片区植被侵蚀控制作用及其水土保持意义[J].昆明理工大学学报(理工版),2004,29(4):176~180

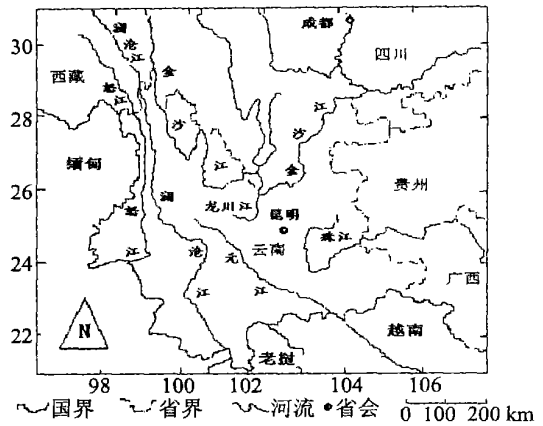


图6 中国西南地区有望使用本方法预测悬沙浓度的诸条大江大河位置示意图
Fig.6 River in the SW China in which the SSC can be predicted with the techniques