地理學報　第三十八期：17-30 (2004)
JOURNAL OF GEOGRAPHICAL SCIENCE (38) : 17-30 (2004)

黃河中游流域產沙量與降雨的關係

Relationships of Specific Sediment Yield to Rainfall in the Middle Yellow River Basin

盧金發*

Jin-Fa Lu

Abstract

More than 50 river basins with areas ranging from 500 to 2,500 km^2 were chosen for an analysis of the relationships between sediment yield and rainfall in the middle reaches of the Yellow River. The basins are categorized into 7 physiographical types. A set of data on sediment yields and rainfall characteristics, surface materials, vegetation covers and morphological features of these basins were collected by using remote sensing data combined with field checks and indoor analyses. Based on such data, a correlative analysis was made between sediment yield and seasonal and annual variations of rainfall and annual average rainfall. It was shown that good positive relationships existed between sediment yields and seasonal and annual variations of rainfall, but different curve slopes and positions were observed when different types of physiographical conditions were taken as parameters. It can be clearly seen that the slopes of the curve lines tend to decrease with their positions, moving gradually downward in an orderly fashion for different types of basins, beginning with the basin of mixed sandy loess and heavily weathered siltstone and moving sequentially to the loess basin, the basin of mixed loess and bedrocks, and finally to the bedrock hill basin. Variations of sediment yields with annual average rainfalls followed the Langbein-Schumm law, but as one moves from the basin of mixed sandy loess and

* 中國科學院地理科學與資源研究所研究員
Professor, Institute for Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences.

heavily weathered siltstone to the bedrock hill basin, the peaks of sediment yield and the threshold rainfall needed for the peaks declined gradually due to the joint effect of rainfall, surface material, vegetation cover and basin morphology.

The environment features of river basins had an important effect on the relationship betweeen specific sediment yields and rainfall index. An integrated index, VSD, based on vegetation covers, surface materials and morphological features, was used to indicate the resistance of river basin environment to erosion and specific sediment yields. It was revealed that specific sediment yields were positively related to the index VSD. Furthermore, a stepwise regression was carried out which showed that the best correlation occurred between specific sediment yield and vegetation cover, followed by drainage gully density and surface material. Rainfall did not enter into the equation. The relationship between specific sediment yield and rainfall was not as good as commonly expected. Compared with the three main factors pf vegetation cover, drainage gully density and surface material, the effect of rainfall on sediment yield is only of secondary importance. This is the reason why the relationships between sediment yields and rainfalls varied markedly from one region to another in the Middle Yellow River Basin.

Keywords: rainfall, the middle Yellow River basin, sediment yield.

摘　要

本文在黃河中游地區選擇了 50 多個水文測站流域，流域面積從 500 平方公里至 2,500 平方公里，分別代表 7 種不同自然地理類型。在流域降雨、泥沙及環境特徵資料獲得的基礎上，建立了流域產沙量與降雨季節性、年際變化和年降雨量之間關係。結果表明，以不同自然地理類型流域為參數，產沙量與降雨季節性變率和年際變率之間有著相當好的正相關關係，而且由沙黃土、砒砂岩流域，經黃土流域、黃土與基岩流域，到基岩山地流域，曲線的斜率漸趨減小，曲線的位置由上而下呈有序的排列。流域產沙量與年降雨量之間關係遵循 Langbein-Schumm 曲線，但是由沙黃土、砒砂岩流域向基岩山地流域過渡，流域產沙量峰值以及峰值出現所需要的降雨量漸趨減小。流域產沙量隨年降雨的上述變化是流域降雨、地面物質、植被和地貌發育程度等共同作用的結果。本文用 VSD 指標表示流域地表環境特性，統計表明，流域產沙量與 VSD 之間有著相當好的正相關關係。逐步回歸分析進一步表明，植被是影響流域產沙量最重要的因數，其次依次是流域溝壑密度和地面物質，而降雨因數沒有進入方程。這說明，與前三個因數相比，降雨對流域產沙量的影響是次要的，從而解釋了為什麼流域產沙量與降雨關係會出現明顯區域差異的原因。

關鍵字：降雨、黃河中游、產沙量

前　言

降雨作為侵蝕產沙的動力條件，一直是中國黃河中游地區流域侵蝕產沙的重要內容之一，近幾十

年來，尤其是圍繞著相同環境條件下，降雨強度對流域侵蝕產沙量影響方面，做了大量的研究工作，並取得了一系列研究成果 (王萬忠，1983；王孟樓與張仁，1990；景可等，1997；蔡強國等，1998)。

黃河中游地區南北縱跨乾旱荒漠草原、半乾旱草原和半濕潤森林草原不同自然地帶，同時受地貌格局的控制，位於不同自然地帶和地域的流域，其降雨特徵及其地帶性或地域性差異都十分明顯，因而對流域侵蝕產沙必然會產生重要的影響。然而，長期以來，有關這一方面的研究開展不多，不同自然地帶和地域流域產沙量與降雨特徵之間究竟遵循什麼樣的變化規律，人們知之甚少。



註：1. 窟野河；2. 無定河；3. 汾河；4. 延河；5. 北洛河；6. 涇河；7. 朱家川；8. 湫水河；9. 馬蓮河；10. 蒲河；11. 葫蘆河

圖 1　黃河中游河口鎮至潼關區間略圖

本文在黃河中游河口鎮至潼關區間，呂梁山以西，六盤山以東，選擇了 50 多個位於不同自然地理地帶和地域的水文測站流域，流域的面積都在 500 至 2,500 平方公里之間，試圖在不同自然地理類型流域劃分的基礎上，建立流域產沙量與不同降雨特徵指標之間關係，進而探討植被、地面組成物質和地貌形態特徵等對流域產沙量與降雨關係的控制作用 (圖 1)。

資料來源和研究方法

本研究的降雨和泥沙資料主要來自黃河水利委員會編輯的供內部使用的黃河流域水文年鑒。資料系列自建站時起，至少有連續 10 年以上記錄最長達 32 年。其中，流域多年平均產沙量採用各流域或流域區間多年平均輸沙模數值表示，即每平方公里每年流域出口控制水文站所測到的懸移質泥沙總量。降雨特徵資料採用流域平均值。對於擁有 2 個或 2 個以上雨量站的流域，其流域平均降雨特徵值則採用流域內全部雨量站的算術平均值。

為了獲取流域環境特性資料，首先將流域劃分為不同基本土地單元，運用遙感方法和地圖量計方法，結合野外實地調查，採集各圖斑岩性、植被、地貌形態等環境特性資料；進而，按各基本土地單元的圖斑面積，加權平均得到全流域的環境特性資料 (王乃斌等，1992)。

其中，圖斑的植被覆蓋度等級主要是採用假彩色合成 TM 衛星影像，依據紅色調與裸露基岩色調的比例關係及溝谷紋理的清晰程度，通過目視解譯確定的，並根據植被對侵蝕影響的已有研究成果及遙感目視解譯的可能性，劃分為五個等級：1. 高覆被的，覆蓋度大於 70%；2. 較高覆被的，覆蓋度為 50 至 70%；3. 中覆被的，覆蓋度在 30 至 50% 之間；4. 低覆被的，10 至 30%；5. 裸露的，覆蓋度小於 10%。

地面物質資料主要是利用衛星影像和地質圖，在野外實地調查的基礎上，依據影像特徵以及地貌、植被等間接指標的差異，目視解釋而得。這裏所述地面物質主要是指岩性，包括不同類型黃土、基岩及其風化層。全區共區分出 3 大類 9 種地面物質。

黃土是黃河中游地區主要的產沙地層之一，分佈面積約占總面積的 70% 以上。不同時代黃土中，晚更新世馬蘭黃土的抗蝕性最差，分佈範圍最廣，因而對侵蝕的影響最大。陝北、晉西和隴東廣泛分佈的三趾馬紅土和甘肅系紅土，由於其未成岩或成岩差，岩性軟弱，極易風化侵蝕，而在現代溝谷下切強烈的地方，作為黃土下伏地層，在地下水的浸泡和潤滑下，常常發生大型滑坡和滑塌，因而是黃河中游地區另一重要的產沙地層。

黃河中游地區的基岩地層，多屬中生代地層，岩層結構緻密，抗蝕能力強，不易遭受破壞，因而侵蝕產沙作用不大。其中，無定河，延河、洛河等支流上游流域的白堊紀紫紅色砂岩，節理不發育，崩塌較少，但抗蝕力差，受暴流侵蝕常形成深窄溝槽，為黃河提供了大量粗泥沙。窟野河中上游、孤山川、皇甫川等流域廣泛出露的侏羅紀、白堊紀長石砂岩和紫色泥岩 (俗稱砒沙岩和羊肝石)，極易風化剝落，崩塌、瀉溜等重力侵蝕十分活躍，是本區最重要的基岩產沙地層，也是無定河以北流域粗泥沙的主要來源之一。

表 1　地面物質因數分值表

岩性	黃　　土			易　　蝕　　岩					硬岩
	沙黃土	黃土	粘黃土	二疊－三疊系砂葉岩	甘肅系 臨夏系	三趾馬 紅　土	侏羅－白堊系砂葉岩	強烈風化的花崗岩	
分值	6.0-9.0	4.0-6.0	<4.0	9.0-10.0	2.5-5.0	2.5-3.0	2.0-2.7	1.5-2.0	0.5-1.0

風成沙地層主要分佈在長城以北，全區面積約 20 萬 km^2，多半屬於風沙影響區，或者黃土沙地區。

在此基礎上，進而由專家通過野外侵蝕特徵的對比，結合水文站輸沙模數以及室內物理力學性質試驗資料的分析比較進行評分，綜合確定各類地面物質的相對可蝕性 (表 1)。其中，沙黃土、黃土和粘黃土的分值，是在黃土帶劃分的基礎上，通過野外侵蝕特徵及輸沙模數的觀察比較，並參考了它們各自在 100 毫米逕流深條件下的相對可蝕性試驗資料而確定的。紅土和黃土的分值的確定，除根據其野外侵蝕特徵及輸沙模數特徵外，還參考使用了二者抗沖刷能力的對比試驗成果 (陳永宗等，1988)。砒砂岩和羊肝石 (二疊紀雜色粉砂岩和紫紅色泥岩) 的分值，則主要是依據其野外侵蝕特徵和水文輸沙模數，在與沙黃土進行比較後確定。風成沙的顆粒較粗，結構鬆散，滲透性好，不易形成地面逕流，侵蝕輕微，其分值取值同硬岩。

對於土石混合類型，地面物質相對可蝕性的確定，要求不僅要考慮黃土與基岩在水平方向上的出露比例，還要考慮它們的垂直方向上的出露比例。類似地，對於以溝蝕為主的地區，地面物質的相對可蝕性和植被覆蓋度等級要求著重考慮溝谷的地面物質和植被；對於以面蝕為主的地區，則主要考慮溝間地的地面物質和植被。

地貌形態指標資料是在不同地貌類型劃分的基礎上，利用 1: 50,000 地形圖取樣量計而得。為了使所量得的資料具有較好的代表性，每一種土地類型至少量計 1 個樣方，且隨著圖斑面積的增大，樣方數目也相應地增加。鑒於本文的目的主要是反映現代侵蝕的強弱，因而溝壑密度著重量計現代溝壑。

進而，依據流域中黃土物質在流域中所占面積比例及其所處的地理位置，結合流域的植被和地貌發育特點，對 50 多個研究流域進行了類型劃分。共劃分出 7 種不同自然地理類型流域：1. 半乾旱低覆被沙黃土、砒砂岩丘陵溝壑流域，2. 半乾旱較低覆被沙黃土、黃土丘陵溝壑流域，3. 半乾旱、半濕潤黃土丘陵溝壑+基岩山地流域，4. 薄層黃土流域，5. 黃土塬流域，6. 半濕潤基岩山地與黃土丘陵溝壑流域及 7. 半濕潤基岩山地流域。其中，黃土丘陵溝壑與基岩和基岩山地與黃土丘陵溝壑的劃分，主要是根據衛星影像上，不同類型地貌和物質特性的面積比例，目視判斷而確定的。皇莆川、孤山川、佳蘆河、無定河等流域，位於半乾旱與乾旱區，鄂爾多斯高原與黃土丘陵之間的過渡地帶，氣候乾旱，多暴雨和大風，植被稀疏，地面物質以沙黃土和砒砂岩為主，風、水兩相侵蝕都十分強烈，是黃河中游地區高產沙集中區，因而單獨列出一類。

流域產沙量與降雨季節性變化特點

流域的侵蝕產沙強度不僅取決於降雨總量，而且在很大程度上與降雨的不均一性密切有關。黃河

中游地區位於乾旱荒漠草原、半乾旱草原和半濕潤森林草原過渡地帶，降雨的季節性變化較大，而且由南而北越趨明顯，因而對流域產沙量及其區域差異勢必起著重要的影響作用。

Fournier (1960) 曾利用降雨季節性變化指標 p^2/P 研究全球不同自然地帶流域產沙量的變化。其中，p 是最濕月降雨量，P 是多年平均降雨量。p^2/P 既隨降雨季節性變化的增加而增加，同時又隨年降雨總量的增加而增加。它不僅反映汛期暴雨的侵蝕作用，還反映季節性乾旱地區植被的減少 (Douglas, 1967)。

Fournier 認為，p^2/P 越大，流域產沙量越大，乾旱地區由於年降雨總量少，逕流小，因而產沙量低；終年濕潤地區，降雨季節性變率小，植被覆蓋較好，產沙量也較低。最大產沙量往往出現在具有明顯旱季的濕潤熱帶氣候地區和地中海氣候區。季風盛行地區，由於旱季明顯，產沙量也較高。

圖 2 是黃河中游地區流域產沙量與 p^2/P 關係。初看起來，圖 2 的點子相當分散，幾乎遍及整個圖幅。然而，將流域劃分為不同的自然地理類型，進而以不同類型流域為參數，建立流域產沙量與 p^2/P 關係以後，情況則完全不同。圖 2 清楚地表明，對於自然地理類型較均一的流域，如類型 1、2、3 和 7.，產沙量與 p^2/P 之間都呈現出相當好的正相關關係，隨著 p^2/P 的增大，流域產沙量漸趨增加；而對於複合類型流域，如類型 4、5、6，關係不理想。

值得注意的是，不同自然地理類型的流域，其產沙量與 p^2/P 的關係曲線在圖 2 中所處的位置各不相同，曲線的斜率也不同。其中，沙黃土、砒砂岩流域位於最上部，曲線的斜率最大；基岩山地流域的位置最偏下，曲線的斜率最小；而且，從上而下，從黃土流域，黃土+基岩山地流域，到基岩山地+黃土流域，曲線的斜率也相應地漸趨減小。

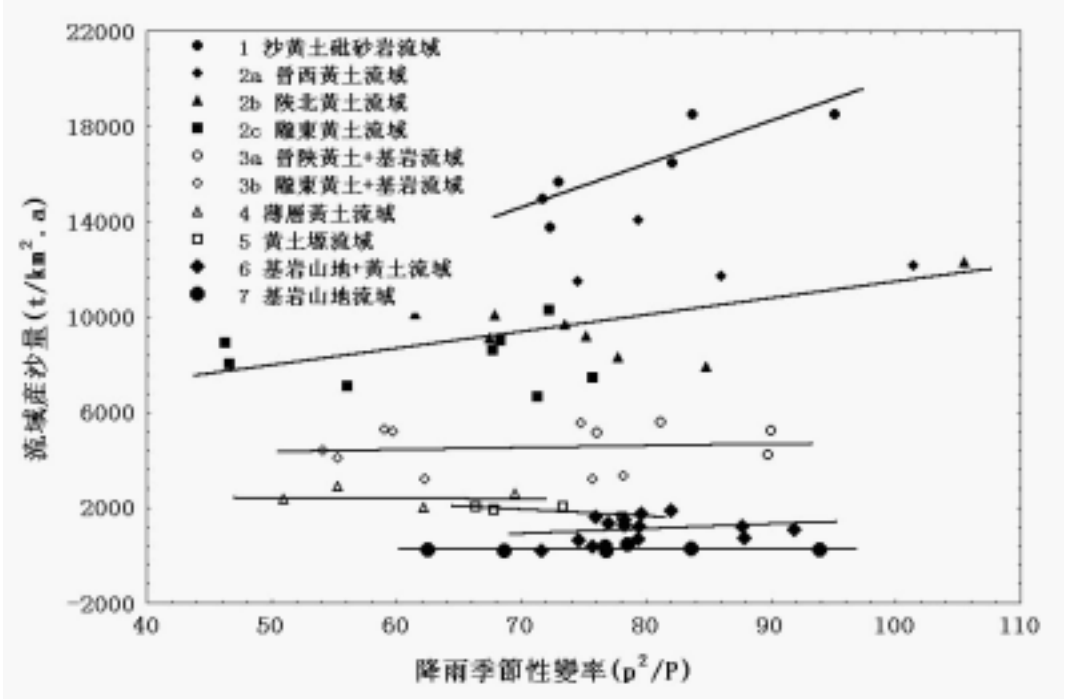


圖 2　黃河中游地區流域產沙量與降雨季節性變率的關係

即使是同一類型流域中，不同地區流域的點據所佔據的位置也各不相同，如晉西、陝北地區的流域多位於曲線的右方和上方，而隴東地區的流域多位於曲線的左方和下方。圖 2 中流域產沙量隨 p^2/P 變化的上述特徵清楚地說明，隨著由半濕潤地區向乾旱、半乾旱地區過渡，由基岩山地流域向黃土丘陵溝壑流域過渡，在同樣的 p^2/P 條件下，流域的產沙量明顯趨於增大；與此同時，隨著 p^2/P 的增大，流域產沙量增加的速率也明顯增加。

造成這一差異的原因，除了不同類型流域之間降雨特徵、地面物質和植被覆蓋的差異外，不同地貌發育程度也起著一定的控制作用。例如，晉西、陝北地區流域地貌發育程度較久遠，現代地表侵蝕切割十分強烈；而隴東地區流域的溯源侵蝕遠未到達河源地區，絕大部分流域的上游和河源地區尚未受到現代溝壑侵蝕切割，保留著大範圍的原生黃土斜梁丘陵、黃土殘原丘陵和黃土　地地形。因而，在同樣降雨條件下，前者的產沙量必然會大於後者。

Fournier 的季節性變化指標原本是用來研究全球不同自然地帶流域產沙量變異規律的。與全球範圍相比，黃河中游地區僅僅是一局部。然而，由於其南北跨越三個不同自然帶，因而 Fournier 的季節性變化指標在該地區仍然適用。需要指出的是，由於黃河中游地區流域特性的地帶性和地域性差異較大，流域產沙量與 p^2/P 的關係不是單一的，而是複合的，流域地表環境特性對流域產沙量與 p^2/P 之間關係的變化起著十分重要的控制作用。

流域產沙量與降雨年際變異特徵

周明衍 (1985) 曾利用複合降水指標 K 研究了晉西地區流域產沙量與降雨的關係。其 K 值的運算式如下：

$$K= a\times M_1/M_{1cp}+ b\times M_{30}/M_{30cp}+c\times M_{汛}/M_{汛cp} \quad \text{……..(1)}$$

式中 M_1，M_{30}，$M_{汛}$分別為最大 1 日，最大 30 日和汛期降雨量，M_{1cp}，M_{30cp}，$M_{汛cp}$ 分別是多年平均最大 1 日，最大 30 日和汛期降雨量。係數 a、b、c 分別為最大 1 日，最大 30 日和汛期產沙量占全年產沙量的百分比。

由式 1 可見，複合降水指標 K 雖然包含了暴雨的資訊及不同降雨特徵值的產沙資訊，但主要還是反映了降雨的年際變差特性。因而，本文採用複合降水指標 K，用以建立流域產沙量與降雨年際變化特徵之間的關係。

圖 3 是黃河中游河龍區間流域產沙量與複合降水指標 K 的關係。由圖可見，對於不同自然地理類型流域，產沙量與 K 值之間呈現出與圖 2 相似的規律，即對於自然地理類型較均一的流域類型 1、2、3 和 7，產沙量與 K 之間都呈現出相當好的正相關關係，而對於類型 4、5、6 這樣的複合類型流域，相關關係不好。圖 2 和 3 的這一現象說明，即使在同一複合類型流域中，其他流域環境特性對流域產沙量影響要大於降雨的作用。

與降雨季節性變率 p^2/P 相類似，受不同類型流域地表環境特性的制約，圖 3 中不同類型流域的位置各不相同，不同類型流域相關曲線的斜率也同樣各不相同。即使是同一類型流域，來自不同自然地理地帶和地域的流域，在曲線中佔據的位置也各不相同。其分佈規律與降雨季節性變率 p^2/P 基本相同。即沙黃土、砒砂岩流域位於最上部，曲線斜率最大，基岩山地流域位置最靠下，曲線斜率最小，其餘

的由上而下，依次為黃土流域，黃土＋基岩流域，薄層黃土流域和基岩山地＋黃土流域。

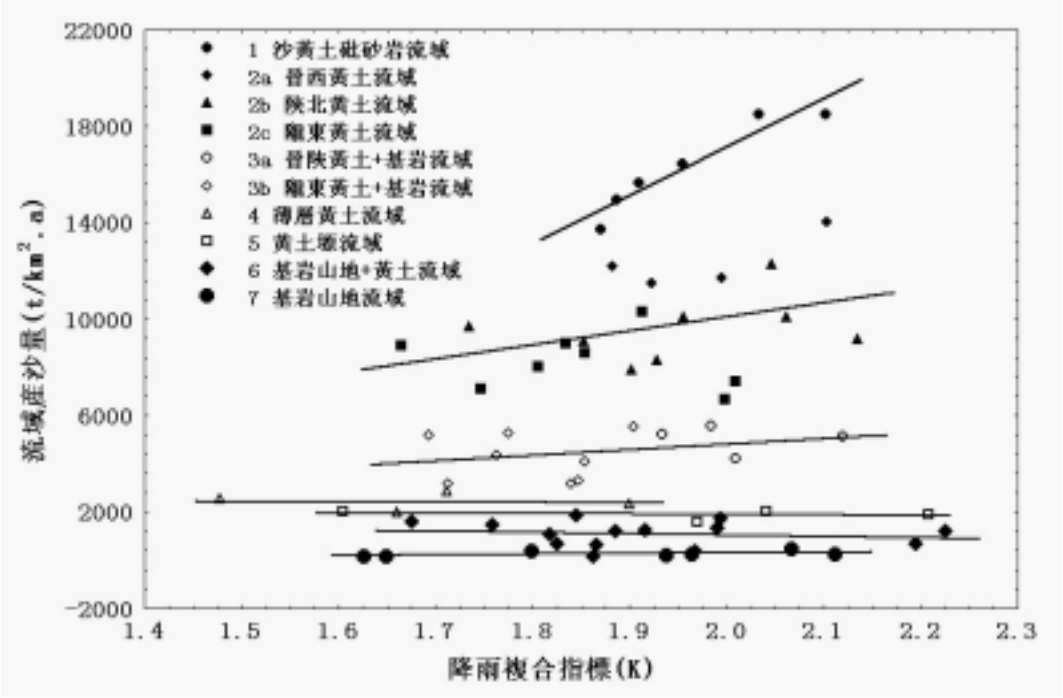


圖 3　黃河中游地區流域產沙量與複合降雨指標 K 的關係

由於複合降水指標 K 不僅反映了降雨的年際變差特性，還包含了暴雨的資訊及不同降雨特徵值的產沙資訊，因此其適用性可能優於 Fournier 的降雨季節性變化指標 p^2/P，尤其是對於流域環境特性比較均一的流域。這一點由圖 2 和圖 3 中曲線相關程度比較即可清楚地看到。

流域產沙量與複合降水指標 K 之間的定量關係又一次說明，在黃河中游地區，流域地表環境特性對流域產沙量起著十分重要的控制作用，而且其影響程度遠遠大於降雨。因此，在進行流域產沙量與降雨關係研究時，必須首先區分不同自然地理類型流域，否則將是無規律可循的，有時甚至還會得出錯誤的結論。

流域產沙量與年降雨量關係

早在 1958 年，Langbein 和 Schumm (1958) 利用美國中西部流域資料提出了著名的 Langbein-Schumm 曲線，認為由於有較多的逕流搬運泥沙，隨著降雨的增加流域產沙量將迅速增加；然而，隨著降雨的增加，植被也變得比較稠密，因而當有效降雨量增大到 300mm 以後，由於植被的影響產沙量反而減少。Douglas (1967) 和 Wilson (1969) 根據更廣泛的資料認為，產沙量與逕流或降雨量的關係應該是雙峰曲線，當逕流達到 40 至 50mm 或降雨量達到 750mm 時，產沙量達到峰值，而逕流達到 1,000 多 mm 或降雨量達到 1,750mm 時，產沙量達到另一峰值，並利用 Fournier 的降雨季節性變

差係數 p^2/P 解釋了雙峰形成的機理．認為前一峰值代表比較乾旱的氣候，而後一峰值代表具有明顯季節性乾旱的季風氣候．由於二者都具有較大的 p^2/P 值，因而導致較大的流域產沙量。

近年來，一些國家和地區的資料表明，流域產沙量與降雨之間呈現為正相關關係，在降雨量較大的情況下流域產沙量並無減少的跡象。Hadley 等 (1985) 曾將全球流域產沙量與降雨資料點繪在一起，兩者之間並無明顯的關係．因而認為，在研究產沙量與降雨關係時必須考慮岩性，植被，土地利用等因素對產沙—降雨關係的控制作用。

圖 4 是黃河中游地區流域產沙量與年降雨量的關係．鑒於黃河中游地區南北橫跨乾旱荒漠草原、半乾旱草和半潤濕森林草原區，與美國中西部地區十分相似，其產沙量與降雨關係基本上遵循 Langbein-Schumm 定律，流域產沙量隨降雨的增加而增加，當降雨量達到近 400mm 時，產沙量達到最大；而當降雨量超過 400mm 以後，產沙量逐漸減少。最大產沙量出現的位置主要在皇甫川、孤山川、佳蘆河一帶，位於鄂爾多斯荒漠草原向黃土高原半乾旱草原的過渡地帶。

與 Langbein-Schumm 研究不同的是，在黃河中游地區，不同自然地理類型流域產沙量與降雨之間關係有所不同，最大產沙量峰值及其所出現的降雨量不同。由圖 4 可見，隨著流域類型由沙黃土、砒砂岩流域，經黃土流域，向黃土+基岩流域和基岩+黃土流域，基岩山地流域過渡，流域產沙量峰值趨於減小，出現峰值的降雨量趨於增大。由於缺乏降雨量小於 500mm 地區的流域資料，基岩山地流域和基岩山地+黃土流域的曲線不完整，但是由曲線的變化趨勢可以推測，其產沙量峰值肯定小於其他類型流域。因此，圖 4 不僅給出了黃河中游地區流域產沙最強烈地區，即無定河以北的皇甫川、孤山川、佳蘆河流域；同時，還指出了不同自然地理類型流域中的強烈產沙區，如黃土流域中的的湫水河、清涼寺溝等流域，從而為流域水土流失治理提供可靠的科學依據。

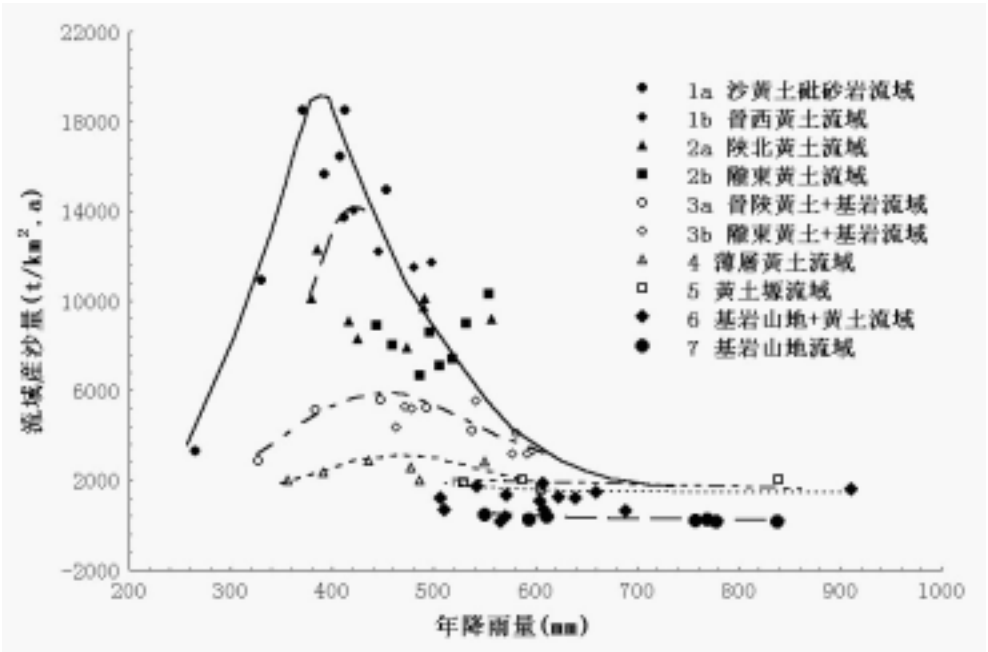


圖 4　黃河中游地區流域產沙量與年降雨量的關係

張信寶與安芷生 (1994) 對黃土高原地區的研究指出，植被覆蓋與黃土厚度之間呈反相關關係，黃土厚度越大，植被覆蓋越差；反之，黃土厚度越小，植被覆蓋越好，並探討了其形成機理。這說明，在黃河中游地區，地面物質組成不僅影響地表抵禦侵蝕的能力，同時還制約著地表植被覆蓋狀況。因而，從沙黃土、砒砂岩流域，經黃土流域，黃土與基岩流域和基岩與黃土流域，向基岩山地流域過渡，隨著地面物質的變化，植被覆蓋也將發生變化，因而流域產沙量隨降雨變化的峰值相應不同，而形成峰值所需的降雨量也不同。假如再考慮到流域地貌發育程度的影響，所以圖 3 中流域產沙量隨降雨的變化規律，應該是降雨、地面物質、植被和地貌發育階段共同作用所致，而並非 Schumm 和 Langbein 所認為，僅僅是降雨和植被相互作用相互制約的結果。

流域環境特性對產沙—降雨關係的控制

鑒於降雨是獨立於下墊麵條件的流域環境因數，在相近降雨條件下，不同自然地理類型流域產沙量的上述差異，首先是反映了流域地表環境條件的控制作用。

黃河中游地區，南北縱跨溫帶半濕潤森林草原、半乾旱草原和乾旱荒漠草原地帶，地貌類型複雜，呈現為山盆相間格局，廣泛分佈著各類黃土地貌為若干山地所分隔，如呂梁山、黃龍山、子午嶺、六盤山等。因而，處於不同自然地理單元的流域，其植被、地面組成物質和地貌形態都各不相同。

圖 5 是黃河中游河龍區間若干流域產沙與流域環境特性的關係，圖中 VSD 是流域地表環境特性綜合指標，表達為

$$VSD = V_c + S_m + D_d \quad \text{……(2)}$$

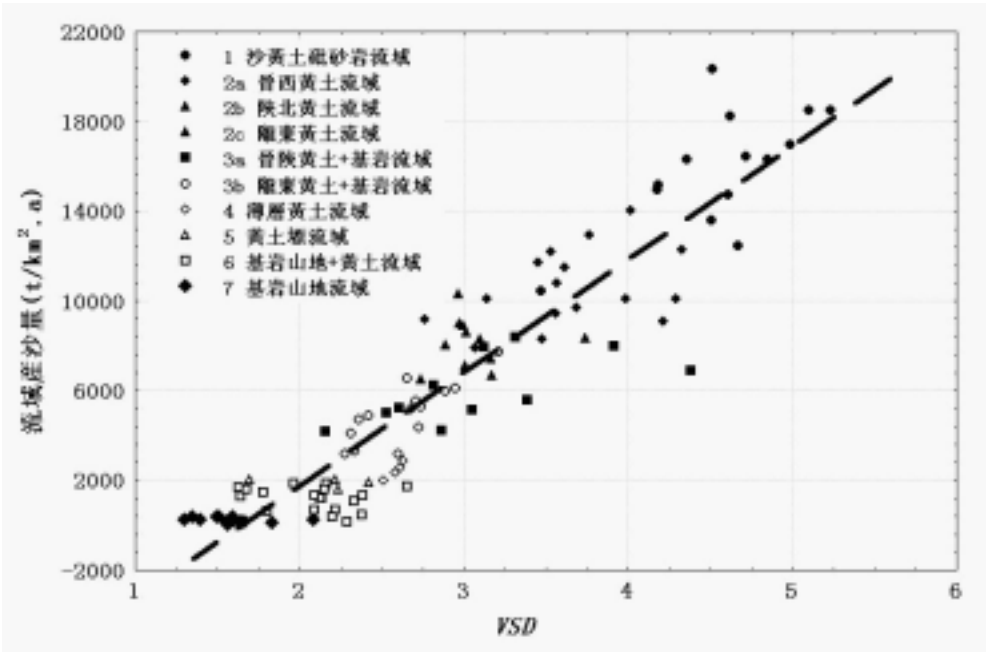


圖 5　黃河中游流域產沙量與流域環境特性的關係

式中 V_c 、S_m 和 D_d 分別為經標準化處理以後流域的植被覆蓋度、地面組成物質和溝壑密度值資料，其中 V_c 等於 1 減去標準化植被覆蓋度，以保證三者變化對流域產沙量影響方向的一致性。顯然，指標 VSD 反映流域地表環境的抗侵蝕產沙能力，*VSD* 越大，流域抗侵蝕產沙的能力越弱，因而在同樣的侵蝕動力條件下，侵蝕產沙強度越大；反之，流域抗侵蝕產沙的能力越強，在同樣的侵蝕動力條件下，侵蝕產沙強度越小。

由圖 5 可見，流域產沙量與流域環境特性之間有著相當好的正相關關係，隨著流域 VSD 值的增加，流域產沙量顯著增加，其相關係數可達 0.93。進一步分析表明，不同自然地理類型流域在圖 5 中所處的位置明顯不同。其中，佳蘆河、皇甫川、孤山川等沙黃土、砒砂岩流域流域位於曲線最上方，由上而下依次為沙黃土、黃土流域，黃土與基岩流域，薄層黃土流域，基岩與黃土流域，基岩山地流域位於曲線的最下方。圖 5 中不同自然地理類型流域所處位置的不同，顯然是由其流域地表環境特性所決定的。

神木以上窟野河流域，位於黃土高原與鄂爾多斯過渡地區，王道恒塔以上部分在地貌上主要由鄂爾多斯高原面組成，地形起伏小，沙地覆蓋面積大，因而流域抗侵蝕產沙的能力相對較強。晉西偏關河和嵐漪河流域位於黃土高原與呂梁山地過渡地帶，流域基岩山地和黃土覆蓋的基岩山地分別占約 70% 和 60%，其中有 50% 和 10% 位於現代侵蝕較弱的唐縣期准平原上，流域平均植被覆蓋度約為 50%，因而流域抗侵蝕產沙的能力也較強。因此，上述流域雖然其緯度與佳蘆河、孤山川、皇甫川流域相近，但在圖 5 中的位置明顯偏下。

圖 5 中各流域所處的位置，與圖 2、3 和 4 所反映的產沙量隨降雨變化特徵完全吻合。可見，圖 2、3 和 4 中不同自然地理類型流域產沙量隨降雨變化速率的不同，主要是受流域地表環境特性所控制的，流域地表環境特性對流域產沙量與降雨關係起著十分重要的影響。

與此同時，對黃河中游地區 100 多個水文測站流域和流域區間資料，進行了逐步回歸分析。回歸分析所用資料預先全部作了標準化處理。獲得的回歸方程如下式所示：

$$Qs = -8938.21-0.699\times \ln V_c + 0.337 \times D_d + 0.102\times S_m \quad \text{……..(3)}$$

$$R = 0.962$$

式 (1) 中 Q_s 是多年平均流域產沙量，$\ln V_c$ 是植被覆蓋度的對數值，S_m 和 D_d 分別為流域的地面組成物質相對可蝕性和溝壑密度 (公里／平方公里)。由式 (3) 可見，降雨因數沒有能進入方程。

表 2　流域產沙量與各環境因素的逐步回歸分析結果和偏相關係數

	係數	偏相關係數	回歸係數 標準誤差	B	截距的標 準誤差	顯著性水平
截距				-8938.21	748.619	4.39E-21
$\ln V_c$	-0.699	-0.808	0.051	-5052.94	365.203	3.83E-25
D_d	0.337	0.700	0.034	2238.139	226.301	1.43E-16
S_m	0.102	0.173	0.058	219.285	123.611	0.079

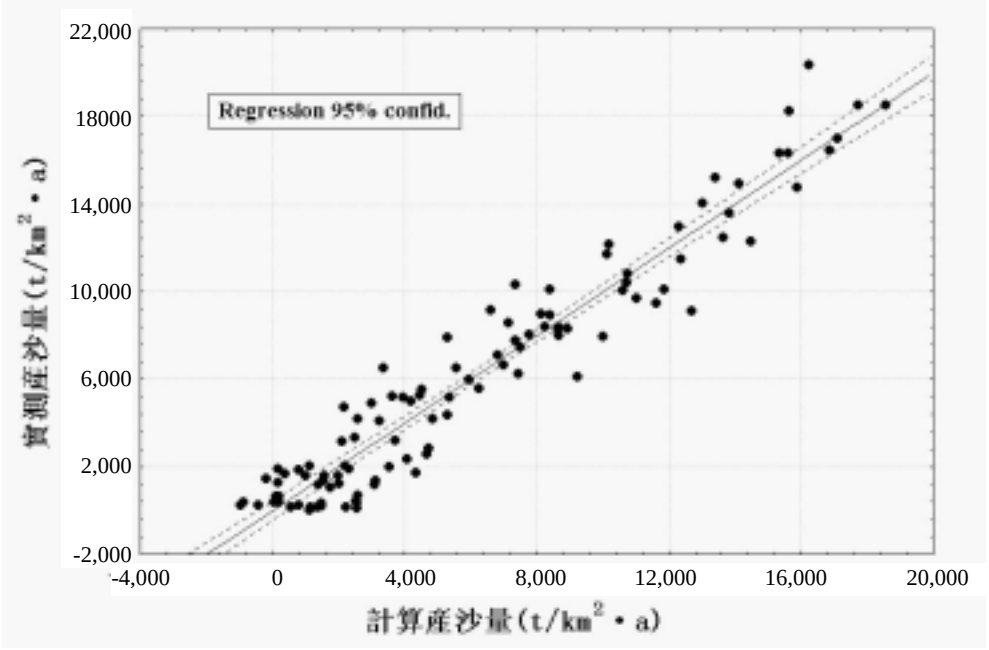


圖 6　實測產沙量與計算產沙量的比較

表 2 和 3 分別是回歸分析結果，偏相關係數和方差分析表，圖 6 是計算產沙量與實測產沙量的比較。由表 2 和 3 可見，流域產沙量與植被覆蓋度之間的偏關係數最大，其次是溝壑密度，地面物質相對可蝕性的偏關係數最小。回歸分析的顯著性水平顯示出類似的結果，即植被覆蓋度的顯著性水平最高，其次是溝壑密度，地面物質相對可蝕性的顯著性水平最低。

表 3　流域產沙量與各環境因素的逐步回歸方差分析表

	方差和	自由度	均方差	F	顯著性水平
回歸	2.77E+09	3	9.24E+08	426.4707	0
殘差	2.21E+08	102	2165798		
總和	2.99E+09				

綜上所述可見，流域植被覆蓋是影響流域產沙量的最重要的因數，其次依次是溝壑密度和地面物質相對可蝕性。與前三個因數相比，降雨對流域產沙量的影響是次要的。換句話說，只有在流域地表環境特性基本均一的情況下，降雨對流域產沙量的影響作用才會顯現出來。因此，這也就不難解釋圖 2、3 和 4 中流域產沙量與降雨關係為什麼會出現明顯的區域差異的原因。

結　論

1. 以不同自然地理類型流域為參數，流域產沙量與降雨季節性和年際變率之間呈相當好的正線性關係，而與年降雨量呈明顯的非線性關係。流域產沙量隨年降雨量變化遵循 Langbein-Schumm 定律，存在著明顯的臨界狀態。

2. 流域產沙量與流域環境特性之間有著十分密切的關係。逐步回歸分析表明，流域植被覆蓋是對流域產沙量起著最重要的控制作用，其次是溝壑密度和地面物質相對可蝕性。降雨雖然是影響流域產沙量的重要因素之一，但在流域環境特性複雜多樣的地區，與前三個因數相比，降雨的影響是次要的。換句話說，只有在流域地表環境特性基本均一的情況下，降雨對流域產沙量的影響作用才會顯現出來。

3. 流域地表環境特性對流域產沙量與降雨特徵關係起著十分重要的控制作用。因而，在黃河中游地區，流域產沙量與降雨特徵之間關係不是單一的，流域產沙量與降雨季節性和年際變率之間呈現為複合的正線性關係，而流域產沙量隨年降雨量變化時，不同類型流域具有不同的產沙量峰值和臨界降雨量。

4. 基於上述研究結果，在進行黃河中游地區流域產沙量與降雨關係研究時，必須首先區分不同自然地理類型流域，否則將無規律可循，有時甚至還會得出錯誤的結論。

謝　辭

衷心感謝國家自然科學基金資助項目 (40171013) 及國家自然科學基金委員會和水利部聯合資助重大項目 (59890200)，使本研究得以順利完成；本研究還得到中國科學院地理科學與資源研究所創新專案資助 (CXIOG-A02-01)，在此一併表示感謝。

引用文獻

王萬忠 (1983) 黃土地區降雨特性與土壤流失關係的研究，**水土保持通報**，3(4): 7-13。

王孟樓、張仁 (1990) 陝北岔巴溝流域次暴雨產沙模型的研究，**水土保持學報**，4(1): 11-18。

王乃斌、沈洪全、趙存興、盧金發、陳光偉 (1992) **黃土高原地區資源與環境遙感調查和系列製圖研究**，北京：地震出版社。

陳永宗、景可、蔡強國 (1988) **黃土高原現代侵蝕與治理**，北京：科學出版社，157-169。

周明衍 (1985) 晉西入黃河流產沙規律和流域治理效果，**山西水文**，(4): 31-40。

張信寶、安芷生 (1994) 黃土高原地區森林與黃土厚度的關係，**水土保持通報**，14 (6): 1-4。

景可、盧金發、梁季陽、張信寶 (1997) **黃河中游侵蝕環境特徵和變化趨勢**，鄭州：黃河水利出版社，60-108。

蔡強國、王貴平、陳永宗 (1998) **黃土高原小流域侵蝕產沙過程與模擬**，北京：科學出版社，9-18。

Douglas, I. (1967) Man, vegetation and sediment yield of river, *Nature*, 215: 925-928.

Fournier, F. (1960) Debit solide des cours d'eau, Essai de la perte en terre subie par l'ensemble du globe terrestre, *IASH Publication*, 53: 19-22.

Hadley, R. F., Lal, R., Onstad, C. A., Walling, D. E. and Yair, A. (1985) Recent development in erosion and

sediment yield studies, *UNESCO, Technical Documents in Hydrology*, Paris, 57-62.

Langbein, W. B. and Schumm, S. A. (1958) Yield of sediment in relation to mean annual precipitation, *Transaction, American Geophysical Union*, 39: 1078-1084.

Wilson, L. (1969) Les relations entre les processus geomorphologiques et la climat modern comme method de paleoclimatologie, *Reuve de Geographie Physique et de Dynamique*, ser. 2, 11: 304-314.

92 年 12 月 1 日　收稿
93 年 10 月 14 日　修正
93 年 11 月 19 日　接受